

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

**Пудкова Тамара Валерьевна**



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ  
НАЛИЧИИ ИСКАЖЕНИЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические  
комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
**Шклярский Я.Э.**

Санкт-Петербург – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1 ОЦЕНКА И ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПАРАМЕТРОВ СЕТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ РЕЖИМЕ</b> .....	12
1.1 Анализ распределительных сетей электротехнических комплексов предприятий среднего напряжения .....	12
1.2 Анализ действующих нормативных документов, определяющих оценку, измерение показателей качества электроэнергии и параметров сети при несинусоидальном режиме.....	19
1.2.1 Организация стандартизации.....	19
1.2.2 Показатели качества электроэнергии при несинусоидальном режиме работы сети .....	22
1.2.3 Примечания и недостатки действующих нормативных документов в отношении измерения ПКЭ при несинусоидальном режиме работы сети .....	37
1.3 Оценка и средства измерения параметров режимов сети и показателей качества электроэнергии.....	40
1.4 Влияние несинусоидальности на учет электроэнергии .....	45
1.5 Выводы по Главе 1.....	48
<b>ГЛАВА 2 ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ НА УРОВЕНЬ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ</b> .....	51
2.1 Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от коэффициента отношения составляющих полного сопротивления ..	52
2.2 Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от мощности короткого замыкания.....	57
2.3 Выводы по Главе 2.....	67
<b>ГЛАВА 3 УЧЕТ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НАЛИЧИИ ИСКАЖЕНИЙ</b> .....	69

3.1	Особенность учета электроэнергии при синусоидальном режиме..	69
3.2	Подходы к учету электроэнергии .....	70
3.3	Применение сертифицированных применяемых приборов учёта электроэнергии .....	74
3.4	Лабораторные исследования влияния высших гармоник на учет потребления электроэнергии.....	79
3.5	Учет электроэнергии при изменении параметров сети, связанных с влиянием высших гармоник.....	85
3.6	Выводы по Главе 3.....	91
<b>ГЛАВА 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЕ СЕТИ .....</b>		<b>93</b>
4.1	Затраты на электроэнергию.....	93
4.2	Влияние нелинейной нагрузки на уровень несинусоидальности на линейной.....	96
4.3	Целесообразность оплаты реактивной мощности .....	102
4.4	Применение статических компенсаторов и активных фильтров для уменьшения затрат на электроэнергию.....	104
4.4.1	Метод анализа спектра напряжения и тока.....	105
4.5	Алгоритм учета потребления электроэнергии .....	114
4.6	Выводы по Главе 4.....	115
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>		<b>117</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>		<b>120</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Расчетная схема первого предприятия среднего напряжения.....</b>		<b>134</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчетная схема третьего предприятия среднего напряжения.....</b>		<b>135</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Зависимость суммарного коэффициента искажения от изменения сопротивлений на линиях .....</b>		<b>136</b>

<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ .....</b>	<b>137</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ .....</b>	<b>138</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс .....</b>	<b>139</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Справка о внедрении результатов диссертационной работы производственную деятельность .....</b>	<b>140</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Функционирование современных электротехнических комплексов и систем невозможно без применения приборов, регистрирующих необходимые данные о различных состояниях процессов в электрических сетях [4; 31]. К таким устройствам относятся счётчики - приборы учета электроэнергии, по которым определяются значения активной, реактивной и полной мощностей.

Поскольку счётчики электроэнергии применяют для двух видов учёта (коммерческого и технического), то неточность показаний таких приборов ведет к проблемам как минимум в двух направлениях: техническом и экономическом. С технической стороны это может приводить к некорректной настройке других приборов и оборудования, работающих на основании снятых показаний. С экономической стороны это ведет к переплате/недоплате за электроэнергию.

Согласно такому федеральному документу, как «Прогноз развития энергетики мира и России до 2040», опубликованном Институтом энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН), «Энергетической стратегии России до 2030 года», опубликованной на сайте Министерства энергетики РФ, концепции «Энерджинет», которая является одной из девяти дорожных карт Национальной технологической инициативы, а также современных общемировых тенденций в сторону «Индустрии 4.0» спрос на электроэнергию и её «умное» потребление будет расти. Это значит, что вопросы учета и распределения энергии будут актуальны, как в течение переходного периода, так и в установившемся процессе после перехода. Принимая во внимание тенденцию к интеграции систем энергоснабжения, в которой разрозненные в управлении системы электро-, тепло-, хладо- и газоснабжения образуют «систему систем», требования к энергетике меняются. При этом, в результате перехода на «энергоэффективное мышление», роль человека меняется от потребителя к активному субъекту (просьюмеру) рынка в интегрированных интеллектуальных системах.

Таким образом, решение вопроса корректности учета потребляемой электроэнергии встает особенно остро. Сейчас это касается в большей степени крупные предприятия электротехнического комплекса, но, согласно вышеуказанным прогнозам и планам, в определенный момент времени коснется и обычного потребителя, который также станет активным участником рынка. Интерес любого участника рынка, чтобы оплата за электроэнергию проводилась максимально компетентно, учитывая рост нелинейной нагрузки среди потребителей социального сектора.

Резюмируя вышеизложенное, решение задач по совершенствованию учета электроэнергии измерительными приборами в условиях несинусоидальности является необходимым и актуальным, как в настоящее время, так и в будущем, как для действующих участников рынка – предприятий, так и потенциальных – активных потребителей.

### **Степень проработанности исследуемого направления**

Принцип расчета полной мощности и её компонентов в электрических сетях при синусоидальном режиме не является дискуссионной задачей. В случае несинусоидального режима (симметричного и несимметричного) выявление расчетных формул для отдельных компонентов полной мощности, как и самих компонентов, является нетривиальной задачей.

Существует множество подходов к учету электроэнергии при несинусоидальном режиме и оживленные дискуссии ведутся до сих пор. Первыми авторами, кто отметил необходимость уточнения расчета мощности стали С. Р. Steinmetz (1895-1920) [103; 104] и М. Пiovic (1925) [46]. Затем свой значительный вклад в развитие теории внесли С. I. Budeanu (1927) [63; 82] и S. Fryze (1932) [18; 63]. Далее, наиболее широкое распространение получили теории авторов, которые совершенствовали эти две базовые теории и разрабатывали свои: P. S. Filipski (1980-1994) [73–75]; А. Е. Emanuel (1977-2017) [66; 69–71; 75; 91; 92; 95; 97]; W. Shepherd и P. Zakikhani (1972) [102]; D. Sharon (1973-2008) [100; 101]; W. J. M. Moore и N. L. Kusters (1980-2017) [85]; С. Н. Page (1980) [94]; Н. Akagi и др. (1984) [50; 51]; M. Depenbrock, D. A. Marshal и J. D. van

Wyk (1993) [67]; E. W. Kimbark (1995) [84]; F. D. Yildirim и W. Fuchs (1999) [105]; L. S. Czarnecki (1987-2018) [57; 57–59; 61; 63; 65]. Из российских учёных вклад внесли Железко Ю.С. [17], Жемеров Г.Г. [18], Жежеленко И.В. [13–15], Розанов Ю.К. [37], Смирнов С.С [40; 41; 43]. На данный момент в действующем стандарте качества электроэнергии ГОСТ 32144-2013 (IEEE. Standard 1459-2010. IEEE Power and Energy Society) учитываются наработки А. Е. Emanuel.

Однако ни в ГОСТах, ни в работах перечисленных авторов не рассмотрено влияние параметров электрической сети в части состава спектра, соотношения линейной к нелинейной нагрузке и влияния сопротивления системы на выбор методики, применяемой для учета электроэнергии в электрических сетях с искажениями.

Тема и содержание диссертации соответствуют научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы по следующим пунктам областей исследований: п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

**Объект исследования** – электротехнические комплексы предприятий, имеющие в своем составе нелинейную нагрузку.

**Предмет исследования** – системы учета потребления электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий в сети среднего напряжения.

### **Идея работы**

Учет потребления электроэнергии зависит от наличия искажений в сети электротехнического комплекса предприятий, при этом полную мощность необходимо разделять на активную и неактивную, учитывающую другие виды

мощности, возникающие при наличии искажений. В свою очередь, несинусоидальность напряжений и токов в сети необходимо оценивать по характеристикам сети и взаимному влиянию линейной/нелинейной нагрузок при условии быстрого определения степени несинусоидальности.

**Цель работы** – совершенствование учета потребления электроэнергии для электротехнических комплексов предприятий за счёт введения дополнительных факторов, повышающих корректность учета активной и реактивной мощности.

### **Задачи исследования**

1. Анализ параметров СЭС среднего напряжения на предмет изменяющихся параметров, связанных с несинусоидальным режимом работы сети, и определение диапазона их изменения;

2. Анализ нормативных документов с целью выявления вводимых ограничений, непосредственно влияющих на учет потребления электроэнергии;

3. Анализ принципов измерения потребления электроэнергии в условиях несинусоидальности при эксплуатации сертифицированных счетчиков;

4. Выявление показателей, определяющих влияние параметров распределительной сети на учет потребления электроэнергии;

5. Разработка компьютерной модели электротехнического комплекса для анализа влияния искажений на учет потребления электроэнергии;

6. Анализ влияния скорости выявления спектра высших гармоник на изменение затрат по оплате электроэнергии;

7. Разработка алгоритма учета электроэнергии в сети в электротехнических комплексах предприятий при наличии искажений

### **Научная новизна**

1. Введен новый показатель  $k_Z^{(h)} = R_S / X_S^{(h)}$ , влияющий на ограничения по току на высших гармониках и доказана зависимость  $THD_U$  от его величины с учетом изменения модуля полного сопротивления системы питающей электросети

2. Выявлена взаимосвязь показателя  $k_Z^{(h)}$  и выбора типа сертифицированных счетчиков реактивной «энергии», определяющих ее величину по разным формулам, заложенным их производителями.

3. Доказано, что влияние нелинейной нагрузки на линейную, с точки зрения образования составляющих несинусоидального тока в линейной нагрузке, всегда незначительно и не может влиять на значение  $THD_U$  в любом узле сети.

4. Доказана неправомерность использования применяемых электронных счетчиков реактивной энергии, некорректно учитывающих искажения в токе и напряжении электрической сети.

5. Разработан новый алгоритм учета электроэнергии в сети, содержащей искажения в токе и напряжении, основанный на применении вновь введенного интегрального показателя тока.

6. Разработан метод определения спектра высших гармоник на интервале в один период основной частоты, отличающийся временем выявления состава спектра напряжения/тока.

### **Теоретическая и практическая значимость исследования**

1. Разработана модель объекта исследования с описанием алгоритма, учитывающего параметры сети, влияющие на учет потребления электроэнергии в условиях несинусоидальности.

2. Разработан новый подход к учету потребления электроэнергии, повышающий корректность оценки показателей качества электроэнергии и самого учета.

3. Результаты исследования рекомендованы к внедрению в учебный процесс Горного университета при реализации специальных программ, также результаты работы приняты к внедрению в электротехнической лаборатории ООО «АСТЕРО», что подтверждается соответствующими актом и справкой о внедрении.

### **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных задач применены методы имитационного моделирования, системного и сравнительного анализа, теоретических основ электротехники, методы анализа и моделирования нелинейных цепей.

Осуществлена систематизация изученных подходов к учёту потребления электроэнергии.

При проведении компьютерного моделирования и для обработки данных, полученных в процессе лабораторных исследований, использовался лицензионный программный пакет MATLAB и среда разработки Simulink.

### **Научные положения**

1. Учет потребления электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий следует проводить при ограничениях по несинусоидальному току и напряжению, учитывающих соотношение активной и реактивной составляющих полного сопротивления питающей электрической сети и его модуль, для выбора соответствующих формул расчета потребления реактивной мощности, измеряемой сертифицированными счетчиками электроэнергии.

2. Алгоритм учета потребления электроэнергии предприятием при наличии искажений, в основу которого положены измерения активной энергии и разности действующих значений полного тока и его активной составляющей, включая режимы коррекции спектрального состава гармоник устройствами с быстрой предиктивной его оценкой, что повышает эффективность оценки влияния реактивной мощности на режимы передачи электроэнергии в СЭС.

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается тем, что: измерения параметров качества электрической энергии, представленных в работе, проводились с использованием сертифицированной и поверенной измерительной аппаратуры; имитационное моделирование проводилось с использованием лицензионного программного обеспечения; статистические данные получены из открытых официальных источников, таких как Росстат; теория построена на основе доказанных зависимостей и согласуется с опубликованными результатами по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК; полученные результаты прошли сравнение с полученными ранее результатами зарубежных и отечественных ученых; идея работы основана на анализе существующих решений данной проблемы; использованы современные методы сбора и обработки данных с применением вычислительной техники.

### **Апробация результатов**

Основные результаты работы и положения докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: международная конференция «Scientific reports on resource issues 2016» - 2016, Фрайберг, Германия; «Прогноз развития ТЭК 2018» - 2018, Москва; «Неделя науки- 2018» - 2018, Санкт-Петербург; IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) – 2019, Санкт-Петербург; международный семинар «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME» -2019, Санкт-Петербург; ISEPC-2019, Санкт-Петербург.

### **Личный вклад автора**

Проведены все этапы исследования, сбор, классификация исходных данных, вывод новой аналитической зависимости, разработка имитационной модели, планирование и проведение имитационного моделирования, подготовка публикаций, заявок на патент, научных докладов и рукописи диссертации.

### **Публикации по работе**

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, в том числе в 5 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье - в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено 2 свидетельства о госрегистрации программы для ЭВМ.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав и заключения, списка литературы, включающего 105 наименований и 7 приложений. Диссертация изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 22 таблицы.

# ГЛАВА 1 ОЦЕНКА И ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПАРАМЕТРОВ СЕТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

## 1.1 Анализ распределительных сетей электротехнических комплексов предприятий среднего напряжения

Для оценки параметров сети, которые могут оказывать влияние на уровень несинусоидальности и, как следствие, на учет электроэнергии, необходимо провести анализ схем электроснабжения действующих предприятий [98].

В работе исследуются сети среднего напряжения 6-10 кВ.

Анализу подвергались централизованные и автономные сети среднего напряжения (приложения А, Б).

Как показано в подразделе 1.2 настоящей главы, в нормативных документах [20; 79] при несинусоидальности вводятся ограничения, согласующие величины показателей несинусоидальности с величиной тока короткого замыкания  $I_{SC}$ .

Модуль тока короткого замыкания напрямую связан с модулем мощности короткого замыкания (1.1)

$$S_{SC} = \sqrt{3} I_{SC} U_{NOM}, \quad (1.1)$$

где  $U_{NOM}, B$  – номинальное напряжение в сети.

В то же время, при неизменном значении номинального напряжения в сети  $U_{NOM} = const$  модуль тока короткого замыкания определяется величиной модуля полного сопротивления системы (1.2)

$$I_{SC} = \frac{U_{NOM}}{\sqrt{3} Z_S}, \quad (1.2)$$

где  $Z_S, Ом$  – модуль полного сопротивления системы.

Необходимо определить в каких пределах может изменяться величина модуля полного сопротивления системы и как это изменение оказывает влияние на величину несинусоидальности.

Известно, что модуль полного сопротивления системы состоит из активного  $R_s$  и реактивного  $X_s$  компонентов, соотношение которых также может изменяться.

В каких пределах лежит интервал изменения данного соотношения и какое влияние оказывает на уровень искажений?

Для учёта данного соотношения введём коэффициент отношения составляющих полного сопротивления на  $h$ -гармонике  $k_Z^{(h)}$  (1.3)

$$k_Z^{(h)} = \frac{R_S}{X_S^{(h)}}, \quad (1.3)$$

где  $R_S$ , Ом – активная составляющая полного сопротивления системы (не зависит от частоты, то есть от порядка гармоники);

$X_S^{(h)}$ , Ом – реактивная составляющая полного сопротивления системы на  $h$ -гармонике.

Таким образом, рассматриваемые сети анализируются на предмет интервалов изменения модуля полного сопротивления системы и величины его активного и реактивного компонентов.

В качестве примера, на рисунках 1.1 и 1.2 представлены схемы замещения первого из анализируемых предприятий в двух крайних состояниях (приложение А).

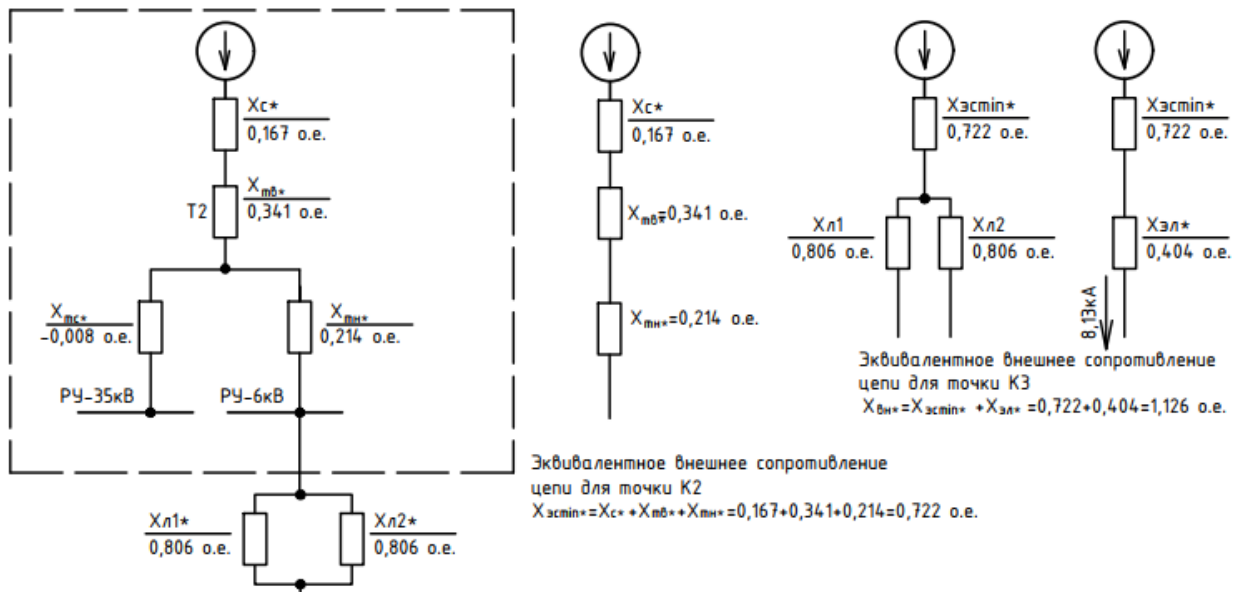


Рисунок 1.1 – Схема замещения первого действующего предприятия среднего напряжения при минимальной нагрузке

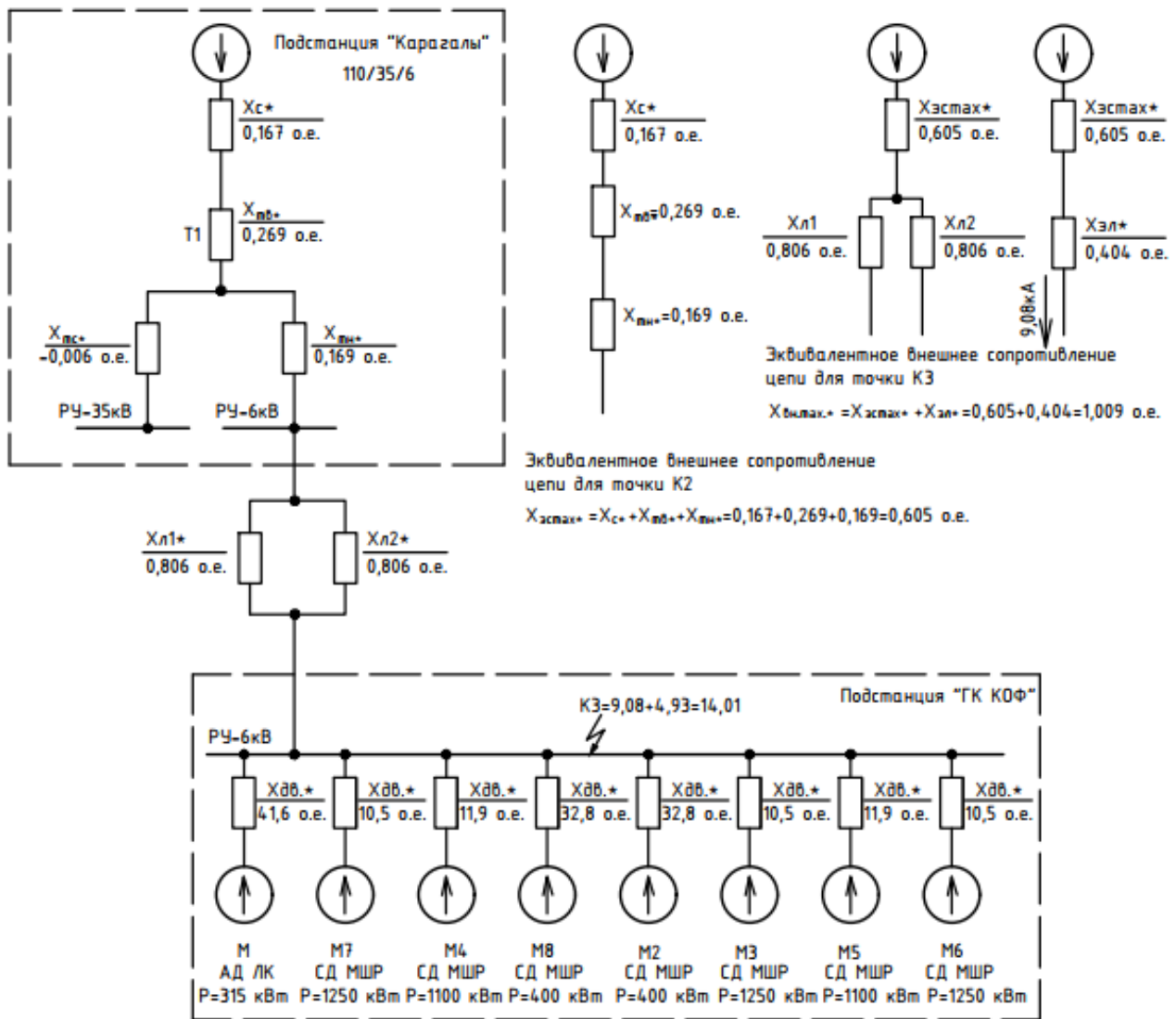


Рисунок 1.2 – Схема замещения первого действующего предприятия среднего напряжения при максимальной нагрузке

Результаты расчетов режимов токов короткого замыкания для режима с минимальной нагрузкой представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Расчет токов трехфазного короткого замыкания в минимальном режиме на первом предприятии

Точка К.З.	Место К.З.	Напряжение, кВ	Нач. значение периодической составляющей тока К.З., кА	
			$I_{К.З.мин}^{3ф}$	
К2	На шинах 6,3 кВ РУ 6кВ	6,3	12,69	
К3	На шинах 6,3 кВ 1 и 2 секц. РУ-6 кВ	Система	6,3	8,13
		Двигатели	6,3	-
		всего	6,3	8,135

Аналогичный расчет для максимального режима представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Расчет токов трехфазного короткого замыкания в максимальном режиме на первом предприятии

Точка К.З.	Место К.З.		Напряжение, кВ	Нач. значение периодической составляющей тока К.З., кА
				$I_{К.З.мин}^{3\phi}$
К2	На шинах 6,3 кВ РУ 6кВ		6,3	15,4
К3	На шинах 6,3 кВ 1 и 2 секц. РУ-6 кВ	Система	6,3	9,08

При таких условиях модуль тока короткого замыкания в трехфазной системе и реактивное сопротивление системы в относительных единицах  $X_c$  (индуктивного характера) составляют значения, представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Параметры системы первого предприятия

РУ- 6 кВ	Трехфазный ток К.З.	Сопротивление системы, о.е. $X_c = S_{\phi} / S_{К.З.} = I_{\phi} / I_{К.З.}$
максимальный режим	$I_{К.З.}^{3\phi} = 14,01 \text{ кА}$	$X_{c.макс} = 0,654 \text{ о.е.}$
минимальный режим	$I_{К.З.}^{3\phi} = 8,13 \text{ кА}$	$X_{c.мин} = 1,126 \text{ о.е.}$

Параметры воздушной линии представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Параметры воздушной линии при проводе 2АСО 600

Базисное напряжение, кВ	Базисная мощность, МВА	Удельное реактивное сопр., Ом/км	Длина линии, км	Число линий	Полное сопротивление ЛЭП, о.е. $X_{лэп} = X_{уд} \cdot \frac{L}{N} \cdot \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}^2}$
$U_{\phi} = 6,3$	$S_{\phi} = 100$	$X_{уд} = 0,4$	$L = 0,8$	$N = 2$	$X_{лэп} = 0,4 \cdot \frac{0,8}{2} \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,403 \text{ о.е.}$

Для первого предприятия характерными являются диапазон изменения модуля полного сопротивления от 0,1 до 2 и соотношения его компонентов от 0,2 до 5, что следует из следующих формул перевода (1.4) и (1.5):

$$S_{\phi} = U_{\phi} \sqrt{3} I_{\phi}; S_{К.З.} = U_{\phi} \sqrt{3} I_{К.З.}, \quad (1.4)$$

$$X_s = X_c \cdot X_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{S_{K.3.}} X_{\sigma} = \frac{U_{\sigma} \sqrt{3} I_{\sigma}}{U_{\sigma} \sqrt{3} I_{K.3.}} \cdot \frac{U_{\sigma}^2 \sqrt{3}}{S_{\sigma}} = \frac{I_{\sigma}}{I_{K.3.}} \cdot \frac{U_{\sigma}^2 \sqrt{3}}{S_{\sigma}}. \quad (1.5)$$

Для других анализируемых предприятий, представленных на рисунках 1.3 и 1.4 данные сведены в таблицах 1.5-1.8.

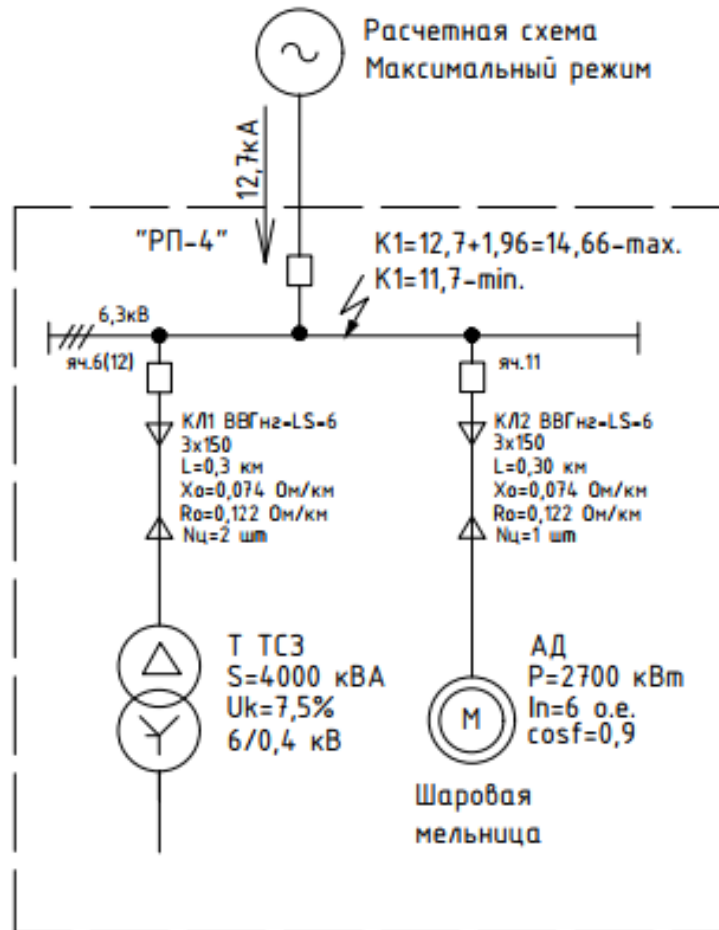


Рисунок 1.3 – Расчетная схема второго предприятия среднего напряжения при максимальном режиме

Таблица 1.5 – Расчет токов трехфазного короткого замыкания в максимальном и минимальном режиме на втором предприятии

Точка К.З.	Место К.З.		Напряжение, кВ	Нач. значение периодической составляющей тока К.З., кА	
				$I_{K.З. макс}^{3\phi}$	$I_{K.З. мин}^{3\phi}$
К1	На шинах 6,3 кВ 1 и 2 секц. РУ-6 кВ	Система	6,3	12,7	11,7

Таблица 1.6 – Параметры системы второго предприятия при  $I_{\sigma}=9,16$  кА

РУ- 6 кВ	Наименование генерирующей ветви	Трехфазный ток К.З.	Сопротивление системы, о.е. $X_c = S_{\sigma}/S_{К.З.} = I_{\sigma}/I_{К.З.}$
максимальный режим	система	$I_{К.З.}^{3\phi} = 12,7$ кА	$X_{c.макс} = 0,722$ о.е.
минимальный режим	система	$I_{К.З.}^{3\phi} = 11,7$ кА	$X_{c.мин} = 0,783$ о.е.

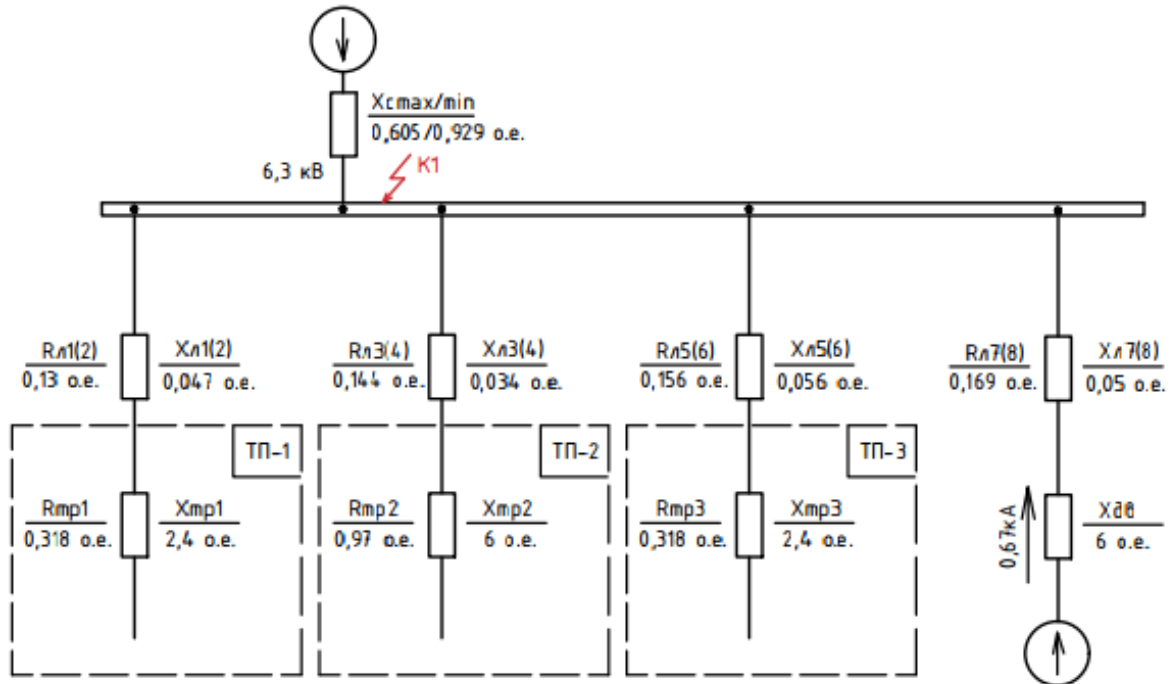


Рисунок 1.4 – Схема замещения прямой и обратной последовательности для третьего предприятия при максимальном и минимальном режимах

Таблица 1.7 – Расчет токов короткого замыкания в максимальном и минимальном режиме на третьем предприятии

Точка К.З.	Место К.З.	Напряжение, кВ	Нач. значение периодической составляющей тока К.З., кА	
			$I_{К.З.макс}^{3\phi}$	$I_{К.З.мин}^{3\phi}$
К1	На шинах 6 кВ РУ-6 кВ	6,3	15,144	9,684

Таблица 1.8 – Параметры системы третьего предприятия

РУ- 6 кВ	Напряжение сети, кВ	Трехфазный ток К.З.	Мощность короткого замыкания, МВА	Сопротивление системы, о.е. $X_c = S_{\sigma}/S_{К.З.}$
максимальный режим	$U_{ном} = U_{\sigma} = 6,3$	$I_{К.З.}^{3\phi} = 15,144$ кА	$S_{\sigma} = 165,25$	$X_c = 0,605$ о.е.
минимальный режим	$U_{ном} = U_{\sigma} = 6,3$	$I_{К.З.}^{3\phi} = 9,684$ кА	$S_{\sigma} = 107,64$	$X_c = 0,929$ о.е.

Дополнительный анализ существующих схем, аналогично приведенному выше, позволил заключить, что диапазон изменения модуля полного сопротивления системы составляет от 0,1 до 2. В приведенных примерах полное сопротивление представлено лишь индуктивным сопротивлением, что справедливо для определения модуля  $I_{K.3}^{3\phi}$ . Однако, введенный коэффициент  $k_Z^{(1)}$  (на основной частоте) может меняться в широких пределах от 0,1 до 5. Верхнего предела может достигать прежде всего в сетях с автономными источниками, нижнего в реактированных сетях.

Отдельно следует проанализировать соотношение между активной и реактивной составляющими сопротивления системы, что, как будет показано во 2 главе диссертации, играет значительную роль при определении показателей несинусоидальности.

Помимо выявленных диапазонов изменения модуля полного сопротивления и коэффициента отношения составляющих модуля полного сопротивления на основной частоте можно обратить внимание на различное соотношение линейной и нелинейной нагрузки. Известно, что наличие нелинейной нагрузки (НН) определяет возникновение высших гармоник (ВГ) в токе. В свою очередь, ВГ тока создают несинусоидальность в напряжении. Несинусоидальное напряжение создает несинусоидальность тока в линейной нагрузке (ЛН), подключенной параллельно с НН. В этом случае взаимное влияние НН и ЛН на учет электроэнергии не изучено

Для определения критериев и показателей, посредством которых проводится оценка качества электрической энергии, необходимо проанализировать нормативные документы. Дополнительно ставится задача выявления недостатков действующих стандартов и методик при оценке несинусоидальности напряжения и тока, а также при учете потребления электроэнергии.

## **1.2 Анализ действующих нормативных документов, определяющих оценку, измерение показателей качества электроэнергии и параметров сети при несинусоидальном режиме**

Для определения показателей качества электроэнергии при наличии несинусоидальности, порядка их оценки и измерения необходимо обратиться к нормативным документам в области качества электроэнергии.

### **1.2.1 Организация стандартизации**

Порядок оценки и измерения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) определяется нормативными документами, которые разрабатываются организациями различных форм, таких как ассоциации, комиссии, сообщества и тому подобные [9]. Однако главным органом в данной сфере является Международная электротехническая комиссия/ International Electrotechnical Commission (МЭК/IEC), которая разрабатывает базовые стандарты мирового уровня (по состоянию на 2019 год организация насчитывает более 80 стран, включая Россию). Некоторые стандарты разрабатываются совместно с Международной организацией по стандартизации/ International Organization for Standardization (ИСО/ISO).

Затем остальные организации разрабатывают свои нормативные документы (не только стандарты, а также технические условия, правила, методики и т.п.), основываясь на стандартах МЭК.

Действие таких нормативных документов распространяется на разных уровнях: межгосударственном; государственном; на уровне организации, разрабатывающей документ.

На территории Российской Федерации в отрасли электроэнергетики действуют нормативные документы, разработанные Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Информация об этих нормативных документах, доступна на сайте Федерального государственного унитарного предприятия «Российский научно-технический центр информации по

стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ») [38].

Росстандарт разрабатывает документы, принимая во внимание не только стандарты МЕК, но и других организаций (таблица 1.9).

Таблица 1.9 – Организации по стандартизации, оказывающие влияние на стандарты РФ в области электроэнергетики

<b>Наименование организации</b>	<b>Сокращенное наименование</b>	<b>Уровень</b>
Международная электротехническая комиссия (совместно с ИСО)	IEC (+ ISO)	Межгосударственный (мировой, более 80 стран)
Европейский комитет по стандартизации в области электротехники	CENELEC	Межгосударственный (мировой, более 30 стран)
Европейский комитет по стандартизации	CEN	Межгосударственный (европейский региональный)
Институт инженеров по электротехнике и электронике	IEEE	Национальный (США)
Альянс отраслей электронной промышленности	IEA	Национальный (США)
Электроэнергетический совет СНГ	ИКЭС	Межгосударственный (страны СНГ)

Поскольку в нормативных документах, действующих на территории России, имеются ссылки на европейские и американские стандарты, то необходимо включить их в анализ (таблица 1.10).

Таблица 1.10 – Действующие нормативные документы, связанные с качеством электроэнергии и несинусоидальным режимом работы сети

<b>Шифр</b>	<b>Наименование</b>	<b>Примечание</b>
ГОСТ 32144-2013 (EN 50160:2010, NEQ)	Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения	В основе лежит ГОСТ Р 54149—2010, поэтому отдельному анализу не подвергается.

## Продолжение таблицы 1.10

ГОСТ 30804.4.7 — 2013 (IEC 61000-4-7:2009)	Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств	Расширяет понятие коэффициента искажения
ГОСТ IEC 61000-4-30— 2017	Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии	Включает ссылки на стандарты серии IEC 60050 (все части), IEC 61180 (все части), IEC 62586 (1 и 2 часть) и серии IEC 61000 (выборочно)
ИКЭС-РД-052-2017	Методика контроля качества электрической энергии, перемещаемой по межгосударственным линиям электропередачи, и определения источника нарушений (искажений) показателей качества электрической энергии	Описывает контроль параметров ГОСТ 32144-2013 и некоторые дополнительные характеристики
СТБ 61000-2-4:2005 (идентичен IEC 61000-2-4:2002)*	Условия окружающей среды. Уровни совместимости в промышленных установках для низкочастотных кондуктивных помех	Вводит дополнительные коэффициенты оценки искажений
IEEE Std 1159™-2009	IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality	Классификация и общие определения
IEEE Std 1459™-2010	IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions	Формулы
IEEE Std 519™-2014	IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems	Ограничения по току и по напряжению

\* данный стандарт включен в список, поскольку идентичен стандарту IEC 61000-2-4:2002, оригинальный текст которого не найден в открытом доступе.

## 1.2.2 Показатели качества электроэнергии при несинусоидальном режиме работы сети

Из ГОСТ 32144-2013 [8]: нормируется только несинусоидальность по напряжению, нормирование по току отсутствует. Учёт ведётся до 40-го порядка гармонических составляющих.

Показатели из стандарта, согласно пункту 3.2 [8]:

$K_{U(n)}$  – коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, % ( $n$  – номер гармонической составляющей напряжения);

$K_U$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, %;

$K_{2U}$  – коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, %;

$K_{0U}$  – коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности, %.

В явном виде стандарт не содержит формул. Исходя из определений, представленных в стандарте в пунктах 3.1 и 4.1 [8], получаются следующие выражения (1.6) и (1.7):

$$K_{U(n)} = \frac{U(n)}{U_1} 100, \quad (1.6)$$

где  $U(n)$  – действующее напряжение на  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения;

$U_1$  – действующее напряжение на основной частоте.

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U(n)^2}}{U_1} 100 = \frac{U(h)}{U_1} 100, \quad (1.7)$$

где  $N$  – номер конечной гармонической составляющей, до которой ведётся учёт;

$U(h)$  – действующее значение напряжения гармонических составляющих.

В диссертационной работе рассматриваются сети среднего напряжения (от 1кВ до 35 кВ), поэтому далее приводятся значения из стандарта, соответствующие только указанному уровню напряжения.

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U$  при напряжении электрической сети 6-25 кВ, усредненных в

интервале времени 10 минут, не должны превышать значений 5 и 8 в течение 95% и 100% времени интервала в одну неделю соответственно [8].

Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$  также усредняются в интервале 10 минут и не должны превышать значений, представленных в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$  при напряжении электрической сети 6-25 кВ

Условия	Значения									
	при нечетных n не кратных трём	n	5	7	11	13	17	19	23	25
	$K_{U(n)}$ , %	4	3	2	2	1,5	1	1	1	1
при нечетных n кратных трём	n	3	9	15	21	>21				
	$K_{U(n)}$ , %	3	1	0,3	0,2	0,2				
при четных n	n	2	4	6	8	10	12	>12		
	$K_{U(n)}$ , %	1,5	0,7	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2		

Для перечисленных в таблице 1.11 гармонических составляющих (гармоник), значения коэффициентов  $K_{U_{норм}}$  не должны превышать указанных значений в одну неделю в течение 95% времени и в течение 100% времени при увеличении значений в 1,5 раза (1.8)

$$K_{U_{норм}} = 1,5 K_{U_{норм}} \cdot \quad (1.8)$$

Интергармонические составляющие напряжения на данный момент не нормируются.

Резюме: в данном стандарте учитываются гармонические составляющие напряжения до 40 порядка, из которых нормированию подлежат все четные и нечетные гармоники, кроме интергармонических составляющих. При нормировании несинусоидальности напряжения *оценивается спектральный состав напряжения* (отношение отдельных гармонических составляющих к основной  $K_{U(n)}$ ), *оценивается искажение напряжения* (отношение действующего значения всех гармоник напряжения к действующему значению основной составляющей  $K_U$ ). Отсутствует нормирование по току и не упоминаются показатели, связанные с мощностью.

**Из ГОСТ 30804.4.7-2013 [5]:** в пункте 3.2 стандарта встречаются термины из ГОСТ 32144-2013 с иным обозначением, а также новые понятия:

$h$  – порядок гармоники;

$Y_{H.h}$  – среднеквадратичное значение гармонической составляющей любого сигнала (для краткости допускается наименование «гармоники»);

$Y_{g.h}$  – среднеквадратичное значение гармонической группы любого сигнала (исследуемая гармоника и примыкающие к ней от  $h_{min}$  до  $h_{max}$ );

$Y_{sg.h}$  – среднеквадратичное значение гармонической подгруппы (исследуемая гармоническая составляющая и две непосредственно примыкающие к ней гармоники).

В свою очередь,  $Y$  – универсальная переменная, вместо которой можно подставлять ток  $I$  или напряжение  $U$ . Когда вместо  $h$  подставляется 1, значит расчет ведется относительно основной гармоники.

Далее приведены определения, входящие в группу «коэффициенты искажения».

Суммарный коэффициент гармонических составляющих (1.9)

$$THD_Y = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left( \frac{Y_{H.h}}{Y_{H.1}} \right)^2}. \quad (1.9)$$

Является полной аналогией суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, где в числителе корень квадратный из суммы квадратов высших гармоник, а в знаменателе остается только основная гармоника.

Также представлены определения и формулы суммарных коэффициентов для групп и подгрупп (1.10) и (1.11) соответственно:

$$THDG_Y = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left( \frac{Y_{g.h}}{Y_{g.1}} \right)^2}, \quad (1.10)$$

$$THDS_Y = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \left( \frac{Y_{sg.h}}{Y_{sg.1}} \right)^2}. \quad (1.11)$$

Затем завершающий показатель в данной группе это частичный взвешенный коэффициент гармонических составляющих  $PWHD_{H.Y}$  (1.13), с помощью которого можно установить норму эмиссии помех, то есть порядок учитываемых гармоник:

$$PWHD_{H.Y.} = \sqrt{\sum_{h=h_{min}}^{h_{max}} \left( \frac{Y_{sg.h}}{Y_{sg.1}} \right)^2} . \quad (1.13)$$

Резюме: в отличие от ГОСТ 32144-2013 расширяет понятие коэффициента искажения, предоставляя возможность проводить оценку по току. Но в то же время не нормирует данный показатель, устанавливая требования только к точности измерения. Также расширение происходит за счет разделения гармоник на группы и подгруппы.

Примечание: в качестве эквивалента понятию «суммарный коэффициент гармонических составляющих» какого-либо параметра обычно применяют термин «коэффициент искажения».

**Из ГОСТ IEC 61000-4-30-2017 [10]:** в пункте 3 стандарта введены понятия заявленного входного напряжения ( $U_{din}$ ), заявленного напряжения системы электроснабжения ( $U_c$ ), среднеквадратичные значения тока ( $I_{r.m.s(1/2)}$ ) и напряжения ( $U_{r.m.s(1/2)}$ ), обновляемые для каждого полупериода и аналогично для напряжения, обновляемого для периода ( $U_{r.m.s(1)}$ ), быстрое изменение напряжения ( $RVC$  – rapid voltage change).

В пункте 4 стандарта представлено описание классов измерений показателей качества электроэнергии и параметров сети, которые упоминаются в последующих нормативных документах. Краткое описание классов содержится в таблице 1.12.

Таблица 1.12 – Классы измерения показателей и параметров

Класс	<b>A</b> (advanced)	<b>S</b> (survey)	<b>B*</b>
Описание	При проведении точных измерений (например, при выполнении договорных условий).	При статистических применениях (оценка и обследование КЭ)	Для получения полезной, но не обязательно сравнимой информации
Примечание	-	Интервалы времени эквивалентны классу А, но требования к обработке ниже.	Методы данного класса не должны применяться в новых средствах измерения

\* применение методов класса В распространяется только на средств измерения, находящихся в процессе эксплуатации на момент выхода стандарта.

В стандарте применяют понятие «влияющие величины», к которым относятся те, которые способны ухудшать качество функционирования средств измерения. Такие величины декларирует изготовитель, описание представлено в стандарте IEC 62586-2-2017 [78].

Средство измерения может применяться для установления значений как одного, так и нескольких показателей и параметров. В таком случае не обязательно, но предпочтительно сохранение класса измерения. Производитель должен указать все условия, необходимые для соответствия измерений указанным классам.

При организации измерений в сетях среднего напряжения необходимо применять измерительные преобразователи, как показано на рисунке 1.5 (непосредственное подключение в основном имеет место в сетях низкого напряжения до 1кВ).



Рисунок 1.5 – Структура измерительной цепи

По определению точек измерения показаний и параметров при несинусоидальном режиме рекомендаций и ограничений стандартом не предусмотрено.

Относительно измерений гармоник напряжения в стандарте посвящен пункт 5.8. По классу А стандарт, в основном, ссылается на требования IEC 61000-4-7[5], класса I. По классу S нормирование проводит изготовитель. Краткое описание сведено в таблицу 1.13.

Относительно измерений гармоник тока в стандарте посвящен подпункт 5.13.4 из пункта 5.13 описания токов, где нормирование описано аналогично гармоникам напряжения.

Таблица 1.13 – Описание измерений гармоник напряжения для классов А и S

Раздел	Класс А	Класс S
Метод измерения	Согласно требованиям IEC 61000-4-7, класс I на основных интервалах времени 10 периодов для частоты сети 50 Гц (без промежутков) до 50-го порядка. Прим. Иногда применяют стандарт IEC 61000-3-8. Помимо суммарных коэффициентов искажений считают суммарный коэффициент гармонических подгрупп THDS <sub>γ</sub> *	Не нормировано. Метод измерения устанавливает изготовитель средства измерения
Неопределенность измерений и диапазон измерений	Максимальное значение неопределенности измерений закреплено в IEC 61000-4-7, класс I. Диапазон от 10 до 200% значения уровня ЭМС обстановки 3 класса по IEC 61000-2-4	Не нормировано. Метод измерения устанавливает изготовитель средства измерения
Оценка результатов измерений	Требования не установлены	
Объединение результатов измерения	Проводится в соответствии с данными стандарта в пунктах 4.4. и 4.5.	

\*при необходимости объем данных можно уменьшить, применяя статистические методы; сохраняя лишь усредненные и экстремальные значения; сохраняя сведения только по превышениям пороговых значений; другими методами.

Резюме: в данном стандарте регламентированы классы измерений и условия их применения. В приложении В пункта 4.2 стандарта упоминаются силовые параметры с пометкой «в основном не рассматриваются, как показатели качества электрической энергии», что не всегда допустимо в сетях с нелинейной нагрузкой. В пункте 4.3 стандарта указана необходимость мониторинга тока, как средства выявления источника искажающей нагрузки, что подтверждается и используется в ходе исследований. Но при этом в стандарте не приводится методики определения источников искажений.

**Из ИКЭС-РД-052-2017 (далее методика) [20]:** представляет собой документ, включающий все сведения из ГОСТ 32144-2013.

Дополнительно введены понятия для тока и мощности (пункты 3.3.4 и 3.3.5 стандарта). Относительно несимметрии добавлены характеристики по току, которые являются полной аналогией для характеристик напряжения, представленных в ГОСТ 32144-2013. Учёт ведётся до 50-ой гармонической составляющей.

В методике указана рекомендация по обеспечению интервала усреднения параметров показателей качества электроэнергии, чтобы он совпадал с интервалом учета электроэнергии. Точки контроля КЭ выбираются в концах линий электропередач (ЛЭП), при необходимости в обоих концах.

Относительно средств и методов измерений в методике дана ссылка на ИКЭС-РД-044-2014 (требования к регистраторам ПКЭ) и ИКЭС-РД-047-2015 (требования к автоматизированным системам контроля ПКЭ), поэтому в диссертационной работе отдельно не рассматривается.

В таблицах 14.2-14.6 стандарта перечислены пороговые значения для коэффициентов искажения только по напряжению, дополнительно ограничений по току не вводится.

В пункте 15 методики определяются критерии, учитывающие вклад источников искажений.

В качестве причин существующих и потенциальных несоответствий установленным нормам показателей качества электроэнергии по несинусоидальности приведены такие факторы, как развитие инфраструктуры электросетей без учёта уже включенных в сеть источников гармонических составляющих и появления дополнительных источников искажения. В качестве дополнительных факторов со стороны экономического аспекта приводится аргумент об отсутствии договорных отношений между потребителем, который является потенциальным виновником искажения, и генерирующей компанией; со стороны технического аспекта отсутствие применения расчетных методов для определения гармонических составляющих напряжения при плановых ремонтах и при искажающей нагрузке.

В качестве решения проблемы в методике предлагается использовать методы прогнозирования состояния системы и изменения параметров, путём оценки отклонения значений от предельно допустимых и вероятность их нарушения с учетом режимов работы сети.

Согласно методике, проводится классификация нагрузки по степени влияния на параметры качества электроэнергии. Перед этим проводится ещё два вида классификации: по разрешенной мощности нагрузки (позволяет выявить потенциальных источников искажений) и по фактической мощности потребления (позволяет уточнить результаты предыдущей классификации). Блок-схема алгоритма двухэтапной классификации представлена на рисунке 1.6.

Через  $a_{\text{доп}}$  обозначено допустимое значение коэффициента  $a$ . В электрических сетях с номинальным напряжением 6кВ и выше принимается равным 0,5.

Расчетные формулы (1.14-1.16):

$$a = \frac{S_{\text{РАЗР}}}{S_{\text{КЗ.НМ}}} 100, \quad (1.14)$$

где  $S_{\text{РАЗР}}$  – разрешенная мощность искажающей нагрузки,

$S_{\text{КЗ.НМ}}$  – наименьшая мощность КЗ в точке общего присоединения (ТОП),

$a$  – коэффициент, характеризующий отношение  $S_{\text{РАЗР}}$  к  $S_{\text{КЗ.НМ}}$ .

$$S_{\text{КЗ.НМ}} = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I_{\text{КЗ.НМ}}, \quad (1.15)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение в ТОП,

$I_{\text{КЗ.НМ}}$  – наименьший ток КЗ в ТОП.

$$S_{\text{РАЗР}} = \frac{P_{\text{РАЗР}}}{\cos \varphi}, \quad (1.16)$$

где  $S_{\text{РАЗР}}$  – разрешенная активная мощность (согласно требованиям по техническим условиям),  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности искажающей нагрузки.

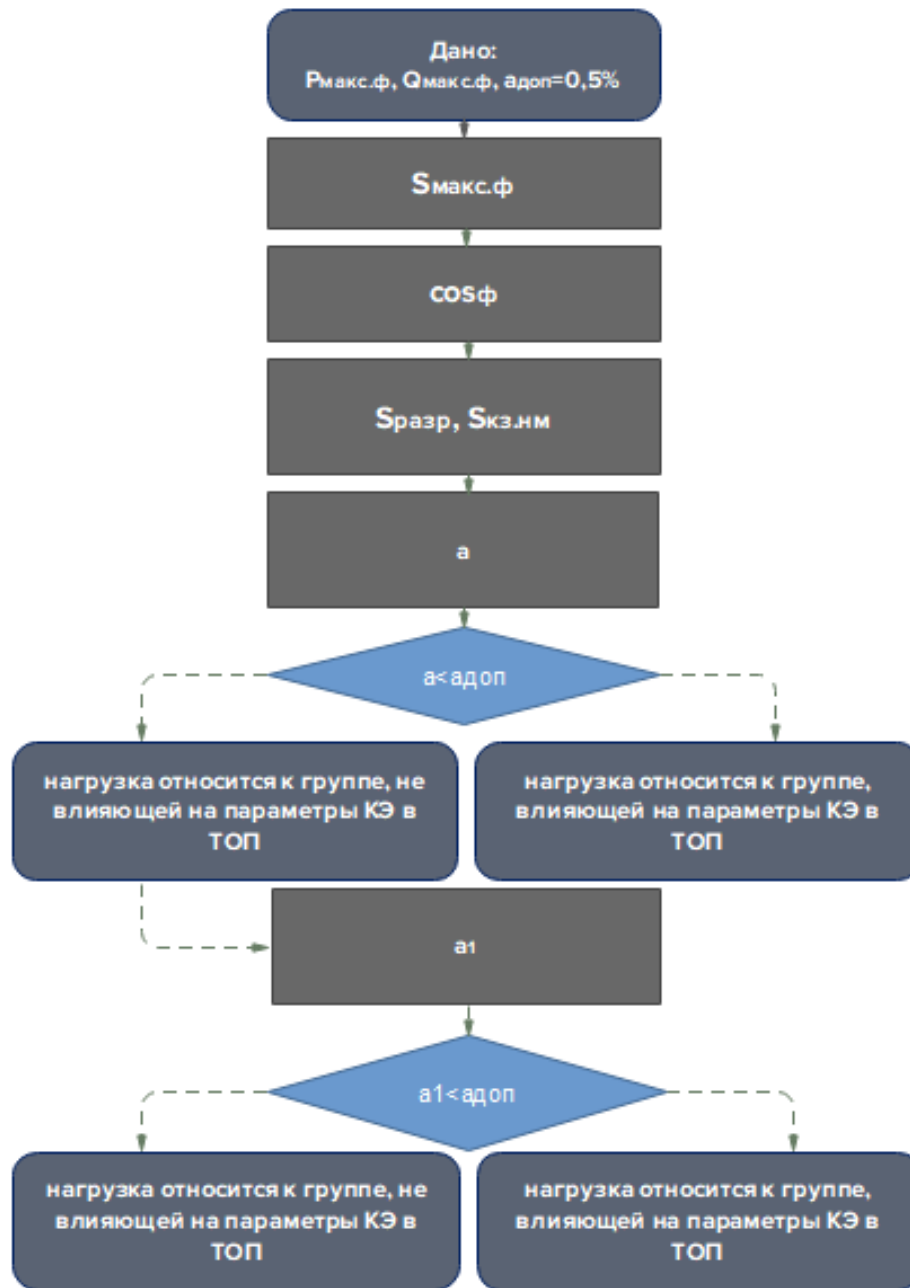


Рисунок 1.6 – Блок-схема алгоритма классификации нагрузки по степени влияния на ПКЭ

В свою очередь, коэффициент мощности и мощность находятся по формулам (1.17) и (1.18):

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{МАКС.}\varphi}}{S_{\text{МАКС.}\varphi}}, \quad (1.17)$$

$$S_{\text{МАКС.}\varphi} = \sqrt{P_{\text{МАКС.}\varphi}^2 + Q_{\text{МАКС.}\varphi}^2}, \quad (1.18)$$

где  $P_{МАКС.Ф}$ ,  $Q_{МАКС.Ф}$ ,  $S_{МАКС.Ф}$  – максимальная фактическая активная, реактивная и полная мощности искажающей нагрузки (активная и реактивная по данным контрольных замеров).

Коэффициент  $a_1$ , характеризующий отношение  $S_{МАКС.Ф}$  к  $S_{КЗ.НМ}$  (1.19)

$$a_1 = \frac{S_{МАКС.Ф}}{S_{КЗ.НМ}} 100. \quad (1.19)$$

Таким образом, когда нагрузка классифицирована, как влияющая на параметры качества электроэнергии, то в стандарте оговаривается совместная ответственность не только со стороны сетевой организации, но и владельца искажающей нагрузки.

При определении источника (виновника) искажений параметров качества электроэнергии в стандарте предлагается выявлять влияние, оказываемое на него, за счёт направления искажений. Этапы такого подхода отражены на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Этапы определения источника искажений ПКЭ

Резюме: в методике не регламентируются значения суммарного коэффициента искажения и коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей при всех классах характеристики процессов измерения ( $A, S$  и  $B$ ).

При измерении гармоник и интергармоник напряжения для тех же классов  $A, S$  и  $B$  область значений влияющей величины задана через ссылку на стандарт

МЭК 61000-2-4-2002 для класса 3 электромагнитной обстановки (для гармоник в части напряжений гармонических составляющих и коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения).

**Из СТБ 61000-2-4:2005 [44]:**

иллюстрирует новые обозначения в уже описываемых ранее понятиях и добавляет новые.

Суммарный коэффициент гармоник (СКГ) (1.20)

$$THD = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=H} \left( \frac{Q_h}{Q_1} \right)^2}, \quad (1.20)$$

где  $Q$  – величина тока или напряжения;

$Q_1$  – значение среднеквадратической величины основной составляющей;

$Q_h$  – значение среднеквадратической величины гармонической составляющей порядка  $h$ ;

$H$  – номер конечной учитываемой гармоники (в стандарте принят равным 50).

*Примечание:* несмотря на то, что название и обозначение коэффициента встречается в ранее упомянутых стандартах, формула имеет другой вид, поскольку в числителе учитывается гармоника на основной частоте! До этого в числителе учитывались только высшие гармоники, начиная со второй.

Полное искажение величины (total distortion content) (1.21)

$$TDC = \sqrt{Q^2 - Q_1^2}. \quad (1.21)$$

Выражение (1.21) показывает величину искажений, то есть вклад только высших гармоник.

Коэффициент полного искажения (total distortion ratio) (1.22)

$$TDR = \frac{TDC}{Q_1} = \frac{\sqrt{Q^2 - Q_1^2}}{Q_1}. \quad (1.22)$$

*Примечание:* коэффициент такого вида в предыдущих нормативных документах обозначался  $THD$  и представлял отношение искажения на высших гармониках к основной гармонике. В качестве универсальной переменной для обозначения величины тока или напряжения выбрано  $Q$ , что представляет



В таблице 1.15 ток  $I_{SC}$  это ток короткого замыкания (short-circuit current), а ток  $I_L$  это максимальный ток нагрузки (основная составляющая) в точке общего подключения в нормальных условиях управления.

Следует подчеркнуть, что, судя по значениям ограничений, приведенным в таблице 1.15, они введены при чисто индуктивном характере полного сопротивления, без учета соотношения его активной и реактивной составляющих.

**Из IEEE Std 1159™-2009 [80]:**

приводится классификация гармоник, где они занимают место среди источников помех на низких частотах. Дополнительно описывается разница между понятиями  $TDD$  и  $THD$ : термин  $TDD$  отличается от  $THD$  тем, что искажение выражается в процентах от тока выбранной нагрузки (например, пиковой нагрузки), а не от среднеквадратичной величины тока основной гармоники.

Также сказано про мониторинг качества электроэнергии в целом и в частности о гармониках, но предельные значения приведены только для напряжения (не более 5%).

**Из IEEE Std 1459™-2010 [81]:**

дополнен определениями, связанными с мощностью:

Активная мощность  $P$ , Вт (active power или real power) определяется как среднее значение мгновенной мощности в течение временного интервала от  $t$  до  $t+kT$  (1.23)

$$P = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} p dt = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} p_a dt, \quad (1.23)$$

где  $p_a$  – среднее значение активной мощности за период,  $Вт$ .

А также активную мощность можно найти из выражения (1.24)

$$P = VI \cos \theta, \quad (1.24)$$

где  $V$  – действующее значение напряжения,  $В$ ;

$I$  – действующее значение тока,  $А$ ;

$\theta$  – угол между векторами напряжения и тока.

Реактивная мощность  $Q$ , вар (reactive power) определяется из выражения (1.25)

$$Q = VI \sin \theta. \quad (1.25)$$

Далее приведены классические формулы нахождения полной мощности  $S$ , ВА (apparent power) (1.26) и (1.27):

$$S = VI, \quad (1.26)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (1.27)$$

Коэффициент мощности, определяемый как отношения активной мощности к полной, обозначен через PF (power factor) (1.28)

$$PF = \frac{P}{S}. \quad (1.28)$$

*Примечание:* в российских нормативных документах коэффициент мощности обычно обозначают через  $\cos\theta$ , что логически выводится при подстановке полной мощности из формулы (1.26) в выражение (1.24):

$$\cos\theta = \frac{P}{S}. \quad (1.24)$$

Определять мощность вышеуказанными формулами справедливо только в синусоидальных цепях при отсутствии искажений.

При учёте электроэнергии при наличии искажений широкое применение находит теория комплексных чисел, с помощью которой полную мощность раскладывают на реальную и мнимую части. В стандарте также описывается такое представление, где активная мощность является реальной частью, а реактивная мнимой (1.25)

$$S = P + jQ = VI^*, \quad (1.25)$$

где  $S$ ,  $V$  – комплексы полной мощности и напряжения;

$I^*$  – комплексно-сопряженный ток.

*Примечание:* в тексте диссертации в последующих разделах и главах применяется другое обозначение комплексов напряжения и мощности.

В стандарте оговаривается, что мгновенные значения напряжения  $u$  и тока  $i$  состоят из двух компонентов – мгновенное значение на 1 гармонике (основной) и совокупное значение всех высших гармоник. Аналогичная ситуация и со среднеквадратичными значениями этих величин.

Дополнительно вводится определение основной (fundamental)  $S_I$  и неосновной (nonfundamental)  $S_N$  полной мощности (1.26) и (1.27):

$$S_I^2 = P_I^2 + Q_I^2, \quad (1.26)$$

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_I^2}. \quad (1.27)$$

В свою очередь, неосновная мощность включает ещё три вида мощности (1.28)

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2, \quad (1.28)$$

где  $D_I$  – мощность искажения тока (current distortion power), вар;

$D_U$  – мощность искажения напряжения (voltage distortion power), вар;

$S_H$  – полная мощность искажения (harmonic apparent power), ВА.

А также отдельно выделяются:

$D_H$  – мощность искажения (harmonic distortion power), вар;

$N$  – неактивная мощность (nonactive power), вар.

Все указанные виды мощности сведены в таблицу 1.16. Более подробное описание формул и связи величин приводятся в следующих главах.

Таблица 1.16 – Виды мощности при нелинейной нагрузке для однофазных систем

Вид мощности	Совокупная	На основной гармонике	На остальных гармониках
Полная, ВА	$S$	$S_I$	$S_N, S_H$
Активная, Вт	$P$	$P_I$	$P_H$
Неактивная, вар	$N$	$Q_I$	$D_I, D_V, D_H$

В трёхфазной системе аналогичное разделение, но добавляется понятие эффективной мощности.

Относительно коэффициентов искажения приводятся отдельные формулы по напряжению (1.29) и току (1.30):

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1}, \quad (1.29)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1}. \quad (1.30)$$

Более того, приводятся различные выражения расчета коэффициента мощности (на основной частоте, а также через активную мощность и коэффициенты искажения по току и напряжению).

### **1.2.3 Примечания и недостатки действующих нормативных документов в отношении измерения ПКЭ при несинусоидальном режиме работы сети**

#### **По ГОСТ 32144-2013:**

*Примечание:* Суммарный коэффициент гармонических составляющих помимо формулы (2) также рассчитывают по следующему выражению (1.31)

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U} 100 = \frac{U_{(h)}}{U} 100, \quad (1.31)$$

где  $U$  – действующее напряжение в ТОП, В.

Такой расчет коэффициента искажения по напряжению не представлен в указанном стандарте. Данную формулу можно вывести из ГОСТ 30804-4-7-2013.

В рамках диссертационной работы сравниваются значения коэффициентов искажения, как по формуле (1.8), так и по формуле (1.31).

*Недостатки:* несмотря на то, что оценивается спектральный состав напряжения через коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, далее в стандарте не указана область применения данного коэффициента и нет связи с другими показателями, перечисленными в стандарте.

Во 2 главе диссертации доказана необходимость учёта данного показателя при оценке параметров качества электроэнергии и параметров сети.

#### **По ГОСТ 30804-4-7-2013:**

*Примечание:* в пункте 6 стандарта указано, что для оценки порядка учитываемых гармоник допускается применять другие принципы анализа.

*Недостатки:* измерения по току нормируются только по точности, предельных значений не устанавливается. Не указано, насколько допустимо переносить предложенные формулы на расчёт коэффициентов искажения по мощности.

#### **По IEC 61000-4-30— 2017:**

*Примечание:* в стандарте дается определение быстрого изменения напряжения и требований к его оценке и измерениям. Результаты исследования (пункт 1.2.1). настоящей главы [23; 24], направленного на быстрое определение спектрального состава напряжения, также могут применяться в целях обнаружения быстрого изменения напряжения и удовлетворяют требованиям, представленным в стандарте.

Также в тексте стандарта оговаривается существенное влияние измерения параметров тока при оценке показателей качества электроэнергии.

*Недостатки:* поскольку средство измерения может применяться для установления значений как одного, так и нескольких показателей/параметров, имея при этом разные классы измерений, то точность оценки измеряемых величин может оказаться недостаточной. Фактором, усугубляющим данную ситуацию, является то, что производитель может предусмотреть не все величины, которые окажутся влияющими на работу средства измерения.

В третьей и четвертых главах настоящей диссертации доказано, что производители средств измерения не только не всегда могут сформировать полный перечень влияющих величин, но и могут применять при разработке средств учёта расчетные формулы, которые не соответствуют процессам, происходящим в сетях с несинусоидальным режимом работы.

#### **По ИКЭС-РД-052-2017:**

*Примечание:* методика позволяет определить «кто виноват» в искажениях, но не учитывает вклад такого источника, относительно остальных.

*Недостатки:* проблему несоответствия значений ПКЭ предлагается решать путём предиктивного анализа, в котором не учитываются случаи возникновения режимов работы, связанных с обстоятельствами непреодолимой силы, а также аварийными ситуациями.

При определении значений параметров по формулам (1.11) и (1.12) не учитывается, что мощность  $Q$  при несинусоидальном режиме принимается, как «неактивная» и раскладывается на компоненты, одним из которых является мощность искажения.

**По СТБ 61000-2-4:2005:**

С одной стороны вводит дополнительные понятия, для разделения искажений на высших гармониках и отдельно рассматривает основную гармонику, что удобно для анализа. С другой стороны, даёт обозначение универсальной переменной буквой  $Q$ , которая занята реактивной мощностью и может привести к ошибкам в расчетах. А также вводит новую формулу под уже закрепленным обозначением THD, где в числителе присутствует основная гармоника.

**По IEEE Std 1459™-2010:**

*Примечание:* в стандарте учитывается особенность несинусоидальных систем, путем введения новых понятий мощности (неактивной и её составляющих). Также отмечается разница при переходе к трёхфазным четырёхпроводным системам. Скорректированы формулы расчёта коэффициентов искажений и коэффициента мощности.

*Недостатки:* не даны рекомендации по применению указанных видов мощности при учёте электроэнергии счётчиками.

**Выводы:**

В нормативных документах обнаружены следующие недостатки:

1) при введении ограничений по току на высших гармониках не учитывается модуль полного сопротивления системы и соотношение его активной и реактивной составляющих;

2) при оценке показателей качества электроэнергии не учитывается влияние соотношения линейной и нелинейной при определении коэффициентов искажения по напряжению и току.

Дополнительно введенные показатели несинусоидальности, связанные с мощностью, также не отражают указанные особенности и дают значительные погрешности при различных сочетаниях активной и реактивной составляющих полного сопротивления системы и его модуля, а также соотношения линейной и нелинейной нагрузки, что показано в последующих разделах диссертации.

### 1.3 Оценка и средства измерения параметров режимов сети и показателей качества электроэнергии

Независимо от вида учета электроэнергии (коммерческого или технического) необходимо применение электроизмерительных приборов [6; 11]. Для определения достоинств и недостатков средств измерения, применяемых для учёта электроэнергии в условиях несинусоидальности, необходимо знать их конструкционные особенности. Это позволит разграничить причины неточности измерений, связаны ли они с физическим состоянием приборов или проблема в выбранном математическом аппарате расчёта итоговых значений измеряемых параметров.

#### Классификация приборов учета электроэнергии

Счётчики электроэнергии применяются для различных целей и условий. Согласно этому можно выделить несколько признаков для классификации (рисунок 1.8).

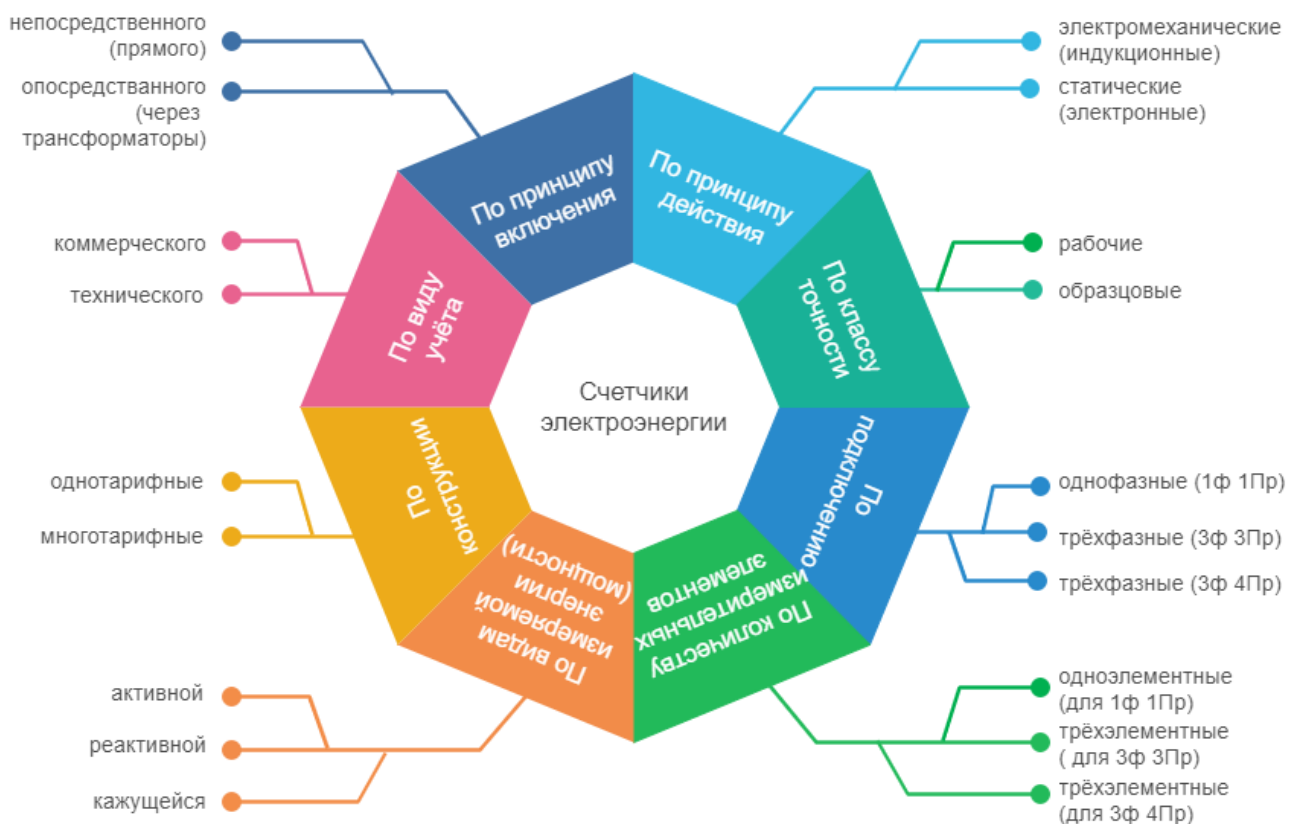


Рисунок 1.8 – Классификация счетчиков электроэнергии

На рисунке 1.8 в качестве сокращений используются «1ф» и «3ф» - однофазные и трёхфазные системы соответственно, а также «3Пр» и «4Пр» - трёхпроводные и четырёхпроводные соответственно.

На рисунке 1.9 представлен общий вид счетчиков двух основных видов: индукционный и электронный, а также гибридный. Данные счетчики содержат цифровой интерфейс, а также механическое вычислительное устройство с измерительной частью либо электронного, либо индукционного типа. Находят узкое применение и рамках диссертационной работы отдельно не рассматриваются. Но поскольку принцип работы заимствован у индукционного счетчика, то с точки зрения измерений будет обладать теми же недостатками.



Рисунок 1.9 – Виды счетчиков электроэнергии:

а) индукционный; б) электронный; в) гибридный

Электромеханические (индукционные) счётчики электроэнергии нашли широкое распространение в сетях переменного тока благодаря относительной дешевизне и простоте конструкции (рисунок 1.10). Их работа основана на вращении диска индукционного измерительного механизма и применяется для регистрации величины потребления активной энергии (мощности).

*Принцип работы:* число оборотов диска, фиксируемое счетным механизмом, прямо пропорционально количеству потребляемой электроэнергии. Магнитное поле катушки счетчика электроэнергии наводит в диске вихревые токи, которые приводят его в движение. Вихревые токи дополнительно создают магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем катушки [26].

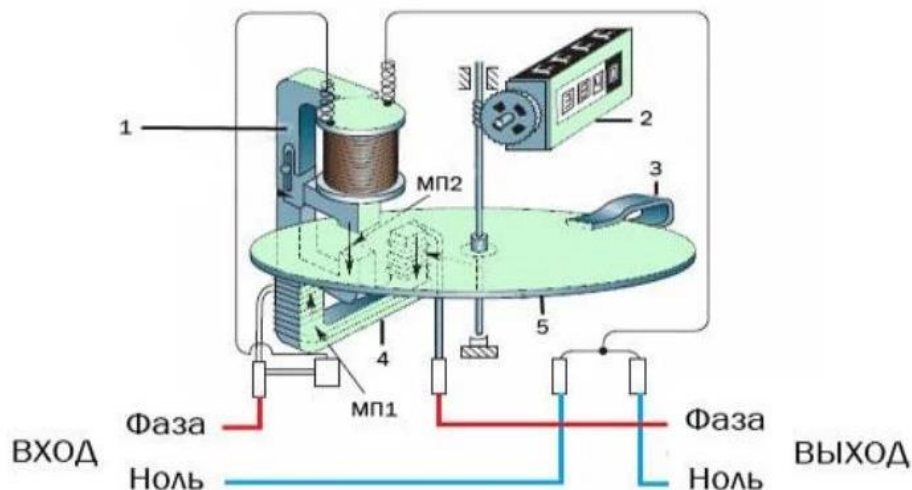


Рисунок 1.10 – Конструкция индукционного счетчика электроэнергии

На рисунке 1.10: 1 – катушка напряжения; 2 – счетный механизм на червячной передаче; 3 – постоянный магнит для плавности хода диска; 4 – токовая катушка (обмотка); 5 – алюминиевый диск; МП1 – магнитный поток, создаваемый током нагрузки; МП2 – магнитный поток, создаваемый током в катушке напряжения.

Ключевым недостатком счётчика данного типа является класс точности, а также возрастание погрешности при измерениях энергии в сетях с нелинейной нагрузкой.

Статические (электронные) счётчики электроэнергии основаны на принципе воздействия на твердотельные (электронные) элементы током и напряжением (рисунок 1.11).

Преимущество счётчиков данного типа заключается в точности и наличии многотарифности. Также с их помощью удобнее измерять активную, реактивную и полную мощности.

*Принцип работы:* на выходе создаются импульсы, частота и количество которых пропорциональны измеряемой энергии и мощности. Такие счётчики содержат дисплей, на который выводятся показания прибора, полученные путем

преобразования аналоговых сигналов. Также конструкция такого счетчика подразумевает содержание запоминающего устройства.

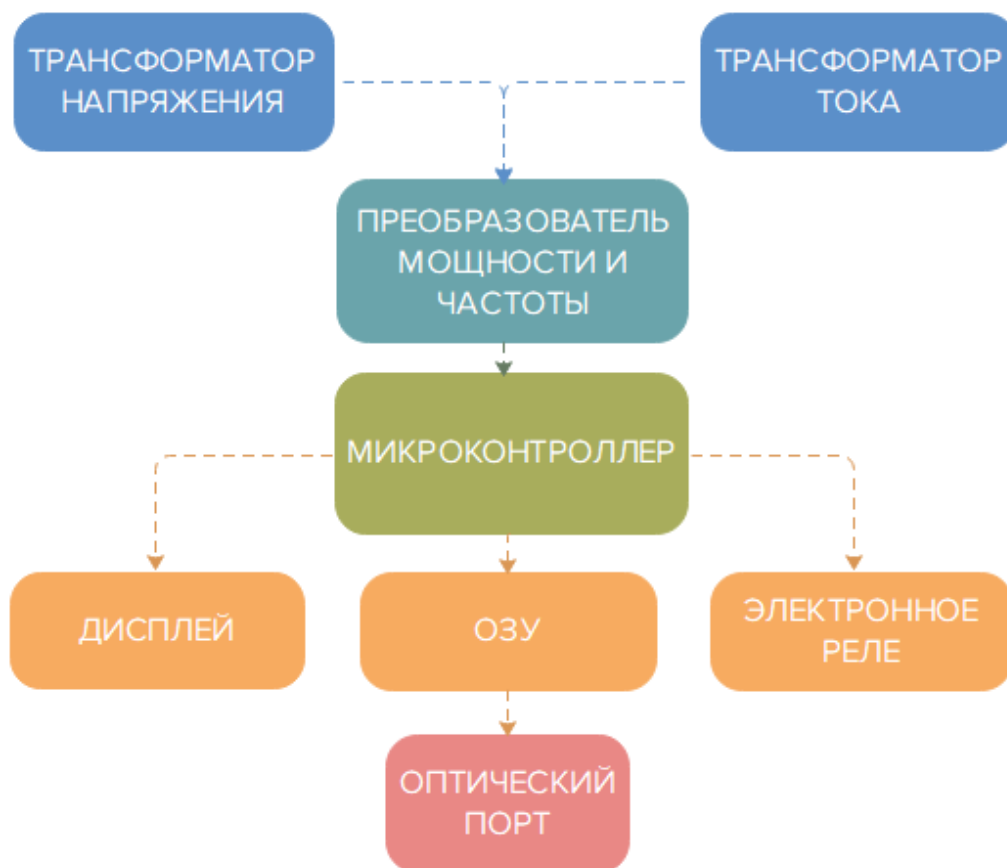


Рисунок 1.11 – Структурная схема электронного счетчика с выходными преобразователями

Показания счетчиков определяются величиной «вшитой» в микропроцессор формулой, которая может быть различной, о чем подробно сказано в 3 главе диссертации.

Выбор электронных счетчиков (класс точности может быть и 0,5 и даже 0,2s) не всегда оправдан. Например, на системном уровне подтверждением может служить то, что после достижения электронными счетчиками в Великобритании доли в 95% в 90-х годах прошлого столетия это значение снова снизилось примерно до 65%.

В цепях постоянного тока нашли широкое применение электродинамические счётчики. Поскольку явление несинусоидальности, то есть искажение формы сигнала тока или напряжения, связано с цепями переменного тока, то данный тип электросчетчиков не рассматривается в рамках диссертационной работы.

## Требования к приборам учета электроэнергии

К основным требованиям, предъявляемым к приборам учёта электрической энергии, можно отнести: класс точности, межповерочный интервал и тарифность.

*Класс точности.* Один из ключевых технических параметров электросчетчика, который определяет погрешность его измерений. На данный момент максимально допустимый уровень погрешности составляет 2,0 [7], то есть 2,0%. В зависимости от целей измерений требования к классу точности прибора могут быть выше, но не ниже.

*Межповерочный интервал.* Период времени с момента первичной проверки электросчетчика (обычно с даты изготовления) до следующей проверки называется межповерочным интервалом, который определяется в годах и записывается в паспорте электросчетчика [26].

В ходе эксплуатации детали электросчётчика изнашиваются и его ключевая характеристика (точность) ухудшается. Если сравнивать индукционные и электронные счётчики, то благодаря простоте устройства индукционные счётчики являются более надёжными. Дополнительную роль играет тот факт, что производители отечественных электронных счетчиков могут не нормировать параметры деталей, из которых состоит прибор.

*Тарифность.* Учёт электроэнергии ведётся по различным тарифам. Согласно классификации (рисунок 1.8) счётчики могут быть одностарифными и многотарифными.

Среди многотарифных счетчиков широкое распространение получили приборы, способные вести учет по двум тарифам: дневному (с 7:00 до 23:00) и ночному (с 23:00 до 7:00). Также на рынке представлены трёхтарифные счетчики, где заложен тот же принцип деления суток на зоны, но уже на другие: пиковая (с 7:00 до 10:00 и с 17:00 до 21:00), среднего (с 10:00 до 17:00 и с 21:00 до 23:00) и низкого расхода (с 23:00 до 07:00).

Многотарифность с точки зрения сбытовых компаний позволяет выровнять нагрузку (количество потребляемой электроэнергии), а пользователям платить за неё меньше. К самым «умным» моделям электросчётчиков можно применить

любую тарифную политику. В тарифный план не обязательно закладывать принцип деления суток на различные интервалы, в равной степени можно делить дни недели, месяца и год.

В перспективе эти интервалы могут стать плавающими и соотноситься не с плановыми пиковыми нагрузками, а фактическими [49]. В рамках четвертой промышленной революции «Индустрии 4.0» и в рамках научно-технической инициативы (НТИ) «дорожной карты» «Энерджинет» стоит необходимость формировать у пользователей энергоэффективное мышление. В этом контексте возможность регулировать тарифность счётчиков играет важную роль.

Как в настоящее время, так и в перспективе, потребителям электроэнергии переменного рода необходимо знать, за какую энергию они платят – «чистую» (синусоидальная форма тока и напряжения) или «грязную» (наличие искажений в синусоидальном сигнале). И в случае с получением «грязной» электроэнергии выяснить источник этих искажений, а если источников несколько, то установить искажающий вклад каждого из них.

#### Выводы:

Как в настоящее время, так и в перспективе, потребителям электроэнергии переменного тока необходимо знать, за какую энергию они платят – «чистую» (синусоидальная форма тока и напряжения) или «грязную» (наличие искажений в синусоидальном сигнале). И в случае с получением «грязной» электроэнергии выяснить источник этих искажений, а если источников несколько, то установить искажающий вклад каждого из них.

Для этого необходимо установить, насколько разнятся показания различных электросчётчиков и от каких условий зависит выбор того или иного прибора учета электроэнергии.

### **1.4 Влияние несинусоидальности на учет электроэнергии**

Явление несинусоидальности возникает в сетях с нелинейной нагрузкой. Такой тип нагрузки встречается как в сетях с традиционными источниками энергии, так и с альтернативными.

Причины увеличения погрешности электросчетчиков представлены на рисунке 1.12.

Согласно ряду исследований [1, 6], результирующая погрешность  $\delta_h$  в присутствии высших гармоник определяется выражением (1.31)

$$\delta_{\Sigma h} \approx \sum_{h=2}^n \Delta P_{h*} \delta_h \approx \sum_{h=2}^n \frac{\Delta P_h}{P_1} \delta_h, \quad (1.31)$$

где  $\Delta P_h$  – мощность на частоте высших гармоник при  $h \geq 2$ ;

$P_1$  – активная мощность на первой гармонике;

$\delta_h$  – относительная погрешность счетчика на частоте  $h$ -той гармоники.

Представленное выражение раскрывает линейную зависимость между относительной погрешностью счетчика на определенной гармонике и величиной её мощности.

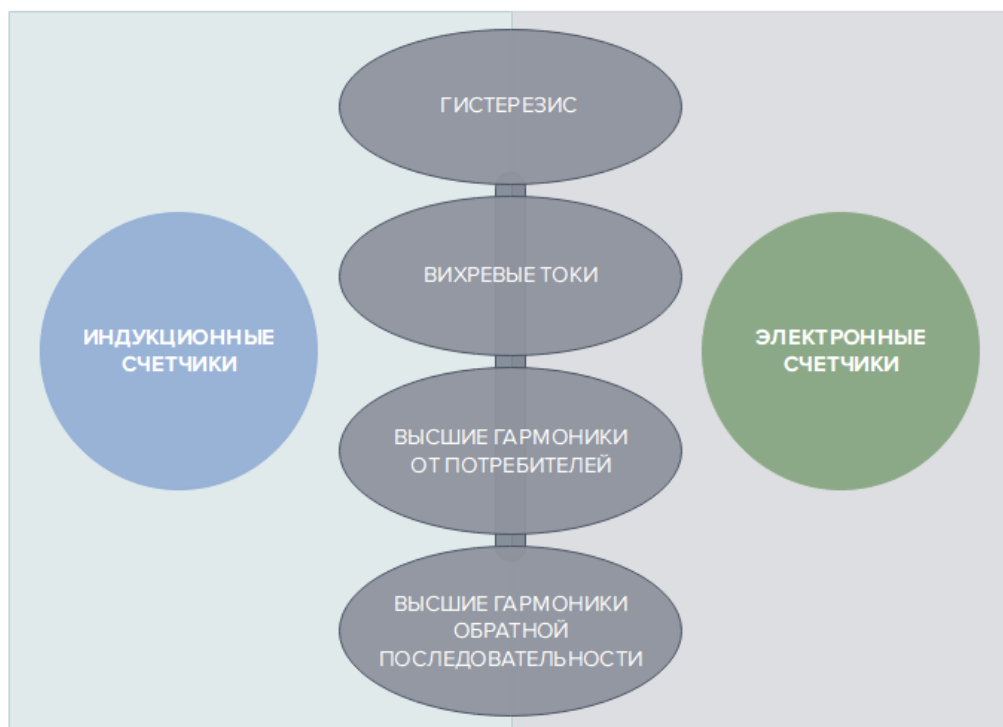


Рисунок 1.12 – Причины увеличения погрешности счётчиков

Представленное выражение раскрывает линейную зависимость между относительной погрешностью счетчика на определенной гармонике и величиной её мощности.

При значительной несинусоидальности напряжения и тока во многих работах, посвященных данной теме [21], предлагается вести учет электроэнергии

на частоте основной гармоники. Такой подход позволяет оценить фактическую погрешность и затронуть решение проблемы учёта электроэнергии при наличии искажений. Причём доказано, что в условиях несинусоидальности питающего напряжения возможны два режима работы счетчика в зависимости от вольт-амперной характеристики (ВАХ) электропотребителя:

- при нагрузке с линейной ВАХ мощность потребления определяется выражениями (1.32)

$$P = P_1 + \sum_{h=2}^n \Delta P_h \delta_h, \quad (1.32)$$

откуда следует  $\delta_h < 0$ , что ведёт к недоучету электроэнергии.

- при нагрузке с нелинейной ВАХ мощность потребления определяется выражением (1.33)

$$P = P_1 - \sum_{h=2}^n \Delta P_h \delta_h, \quad (1.33)$$

где  $\delta_h > 0$ , так как потребитель является источником искажений для сети, что ведёт к переучету электроэнергии и появлению положительной величины погрешности счетчика. Такой потребитель несет повышенную плату, поскольку является причиной ухудшения качества электроэнергии.

Как показывают дальнейшие исследования, погрешность измерения реактивной мощности может отличаться не только при разных видах и типах счётчиков, но и в рамках одного типа и вида счетчика разных производителей.

Калибровка измерительных устройств проводится при чисто синусоидальном напряжении, что также ведёт к погрешности измерения мощности при наличии искажений. Наличие несинусоидальности напрямую влияет на корректность работы измерительных устройств, что подтверждается рядом исследований на данную тему [21; 27; 57; 69], а также в диссертационной работе.

На ежегодной профильной конференции, посвящённой вопросам качества электроэнергии (Горно-металлургическая академия, г. Краков, Польша) регулярно поднимается вопрос влияния наличия искажений на измерение электроэнергии

счётчиками различных производителей. По итогам конференции, число участников со стороны производителей сократилось вдвое [45]. Данное обстоятельство характеризуют поднятый вопрос, как неоднозначный. И, несмотря на наличие нормативных документов, прописывающих порядок измерения, производители делают допущения, которые ведут к увеличению погрешности измерений.

#### Выводы:

Наличие высших гармоник влияет на итоговые значения, регистрируемые приборами учета электроэнергии. В большей степени на это оказывает влияние не физические характеристики счётчиков, а характеристики сети, что показано в дальнейших исследованиях.

Благодаря различным подходам к учету электроэнергии можно установить математический аппарат, который наиболее корректно применять при учёте электроэнергии при несинусоидальности.

Как показано в дальнейших главах диссертации, при этом необходимо учитывать топологию электрической сети и соотношение активной/реактивной составляющих полного сопротивления, соотношение видов нагрузки (линейная и нелинейная), а также спектральный состав.

### **1.5 Выводы по Главе 1**

В различных нормативных документах одни и те же показатели могут носить разное обозначение и иметь визуально отличающиеся формулы, но описывать одно и то же явление. И наоборот, один и тот же термин может раскрываться в стандартах по-разному. Это вносит существенные трудности при анализе электротехнических комплексов предприятий при наличии искажений.

Для подтверждения найденных недостатков стандарта и определения способов их устранения, а также для обеспечения соответствия корректным требованиям нормативных документов в техническом аспекте (показатели качества электроэнергии при несинусоидальном режиме работы сети) и в экономическом аспекте (тарификация оплаты) необходимо учитывать следующее:

- ✓ величина модуля полного сопротивления системы;
- ✓ отношение активной составляющей полного сопротивления системы к реактивной (определяемых расчетным путем), поскольку при одних и тех же модулях полного сопротивления значения суммарных коэффициентов искажения могут отличаться;
- ✓ соотношение линейной и нелинейной нагрузок, поскольку величина несинусоидальности напрямую связана с нелинейной нагрузкой, так как при чисто линейном характере нагрузки несинусоидальный режим отсутствует (кроме случая несинусоидальности напряжения, вызванной внешней сетью).

Из вышеприведенного анализа сформирована цель диссертационной работы: совершенствование учета потребления электроэнергии для электротехнических комплексов предприятий за счёт введения дополнительных факторов, повышающих корректность учета активной и неактивной мощности.

Задачи исследования:

1. Анализ параметров СЭС среднего напряжения на предмет изменяющихся параметров, связанных с несинусоидальным режимом работы сети, и определение диапазона их изменения;
2. Анализ нормативных документов с целью выявления вводимых ограничений, непосредственно влияющих на учет потребления электроэнергии;
3. Анализ принципов измерения потребления электроэнергии в условиях несинусоидальности при эксплуатации сертифицированных счетчиков;
4. Выявление показателей, определяющих влияние параметров распределительной сети на учет потребления электроэнергии;
5. Разработка компьютерной модели электротехнического комплекса для анализа влияния искажений на учет потребления электроэнергии;
6. Анализ влияния скорости выявления спектра высших гармоник на изменение затрат по оплате электроэнергии;
7. Разработка алгоритма учета электроэнергии в сети в электротехнических комплексах предприятий при наличии искажений.

С точки зрения технологического процесса это позволит обеспечить нормальную работу оборудования или, по возможности, повысить эффективность его работы; с точки зрения экономической составляющей позволит регулировать финансовые отношения между виновником снижения КЭ и нормальным участником энергосистемы, права, обязанности и ответственность участников рынка электроэнергии.

## ГЛАВА 2 ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ НА УРОВЕНЬ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ

Как показано в первой главе в части анализа стандартов (IEC, IEEE, СНГ и ГОСТ), базовым и универсальным показателем, ограничивающим несинусоидальность режимов сети является суммарный коэффициент искажения по напряжению  $THD_U$ . Нормирование аналогичного коэффициента по току приводится только для отдельных учитываемых гармоник, исходя из модуля тока короткого замыкания  $I_{SC}$  в точке конкретного присоединения.

Как показано в подразделе 1.1 диссертации, ток короткого замыкания напрямую связан с модулем мощности короткого замыкания  $S_{SC}$  (1.1) и обратно зависит от модуля полного сопротивления системы (1.2). Для учета соотношения активного и реактивного сопротивлений, входящих в состав полного, введён коэффициент отношения составляющих полного сопротивления на  $h$ -гармонике  $k_Z^{(h)}$  (1.3).

При различных значениях вышеуказанного коэффициента падение напряжения в системе меняется, а также это изменение может влиять на уровень несинусоидальности. Тогда это приводит к выводу о некорректности ограничений, введенных стандартами.

Поэтому возникает задача оценки влияния данного коэффициента отношения составляющих полного сопротивления при фиксированных значениях модуля полного сопротивления  $Z_S$  на падение напряжения в системе на высших гармониках и, как следствие, на  $THD_U$ .

С этой целью проведены эксперименты посредством компьютерного моделирования режимов работы сети в среде MatLab Simulink, представленные в следующем подразделе настоящей главы.

При этом, согласно принятому подходу расчета установившихся процессов при наличии высших гармоник, поперечной емкостной составляющей сопротивления пренебрегаем. Однако следует заметить, что фактор емкостного сопротивления наверняка играет роль в оценке о ограничении величин тока высших гармоник. Влияние этого фактора должно изучаться отдельно.

## 2.1 Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от коэффициента отношения составляющих полного сопротивления

Эксперимент №1 посвящен исследованию влияния составляющих полного сопротивления системы на величину искажения напряжения. В результате получены зависимости суммарного коэффициента искажения по напряжению от активного компонента полного сопротивления системы  $THD_U=f(R_s)$  и от вновь введённого коэффициента отношения компонентов модуля полного сопротивления на основной частоте  $THD_U=f(k_Z^{(I)})$ .

Условия эксперимента:

- 1) номинальное напряжение  $U_{НОМ}$  сети 6 кВ, так как рассматриваются сети среднего уровня напряжения 6-10 кВ;
- 2) фиксируется значение модуля полного сопротивления  $Z_S$ , в состав которого входит активная составляющая и реактивная составляющая ( $R_s$ ,  $X_s$ );
- 3) соотношение активного и реактивного компонентов полного сопротивления регулируется введённым коэффициентом отношения составляющих полного сопротивления на основной частоте  $k_Z^{(I)}$ ;
- 4) значение активного компонента  $R_S$  варьируется от 0,1 до 1 Ом, поскольку такие значения сопротивления находят широкое распространение в действующих сетях предприятий среднего напряжения;
- 5) рассматривается три случая: ток нагрузки максимален (5 кА), минимален (1 кА) и имеет среднее значение (2,5 кА), как наиболее характерные значения для сетей среднего напряжения.

На рисунке 2.1 представлена схема, разработанная в среде MatLab Simulink.

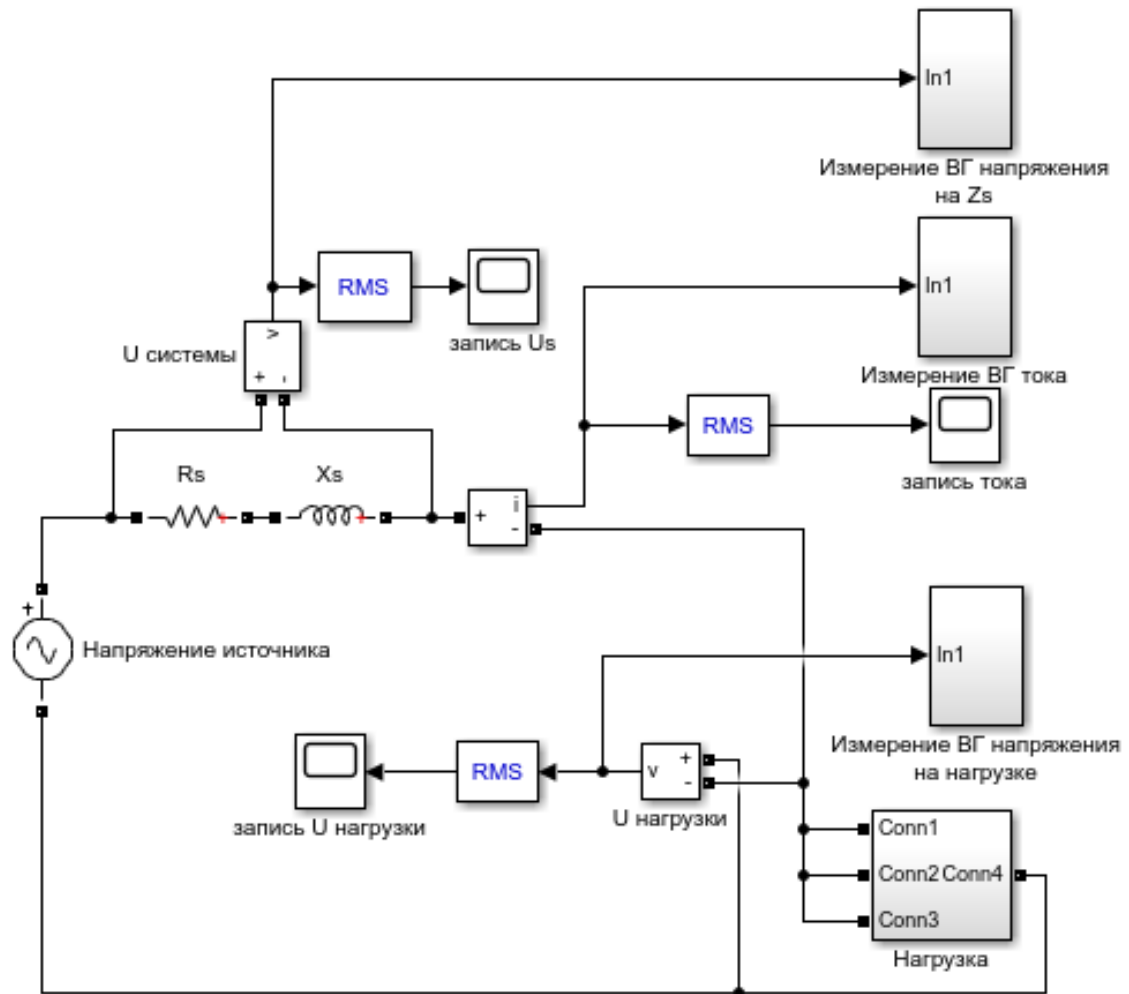


Рисунок 2.1 – Схема исследования зависимости коэффициента искажения по напряжению от соотношения компонентов модуля полного сопротивления системы

Математическое описание модели приведено ниже.

Расчёт суммарного коэффициента искажения по напряжению  $THD_U$  проведен по классической формуле, отраженной в ранее обозреваемых стандартах (1.29).

Значения гармонических составляющих определяются номером гармоники согласно выражению (2.4)

$$i_h = \frac{i_1}{h}, \quad (2.4)$$

где  $i_1$  – величина комплексного тока на основной частоте;

$h$  – номер гармонической составляющей.

Это допущение принято для наиболее худшего варианта, когда в качестве источников высших гармоник принят шестипульсный выпрямитель в асинхронном частотно-регулируемом приводе.

Падение напряжения в линии  $\Delta\dot{U}^h$  определяется на каждой гармонике отдельно, исходя из величины тока и сопротивления (2.5)

$$\Delta\dot{U}^h = \sum_{h=1}^{h_{max}} \dot{i}^h Z_s^h, \quad (2.5)$$

где  $Z_s^h$  – комплекс полного сопротивления общей линии (системы) на высших частотах;

$h_{max}$  – порядковый номер наибольшей учитываемой гармоники.

Фазное напряжение на нагрузке  $\dot{U}_L$  рассчитывается с учётом падения напряжения в общей линии (2.6)

$$\dot{U}_L = \dot{U} - \Delta\dot{U}_h \quad . \quad (2.6)$$

Величины фазного тока  $\dot{i}_{sc}$  и полной мощности  $\dot{S}_{sc}$  короткого замыкания связаны и рассчитываются по следующим формулам (2.7) и (2.8):

$$\dot{i}_{sc} = \frac{\dot{U}}{Z_s}, \quad (2.7)$$

$$\dot{S}_{sc} = \dot{i}_{sc}^2 Z_s = \frac{\dot{U}^2}{Z_s}. \quad (2.8)$$

При одном и том же значении тока нагрузки  $I$  и одинаковом значении мощности короткого замыкания  $S_{sc}$  получаются различные значения суммарного коэффициента искажения по напряжению при изменении соотношения компонентов модуля полного сопротивления (рисунок 2.2).

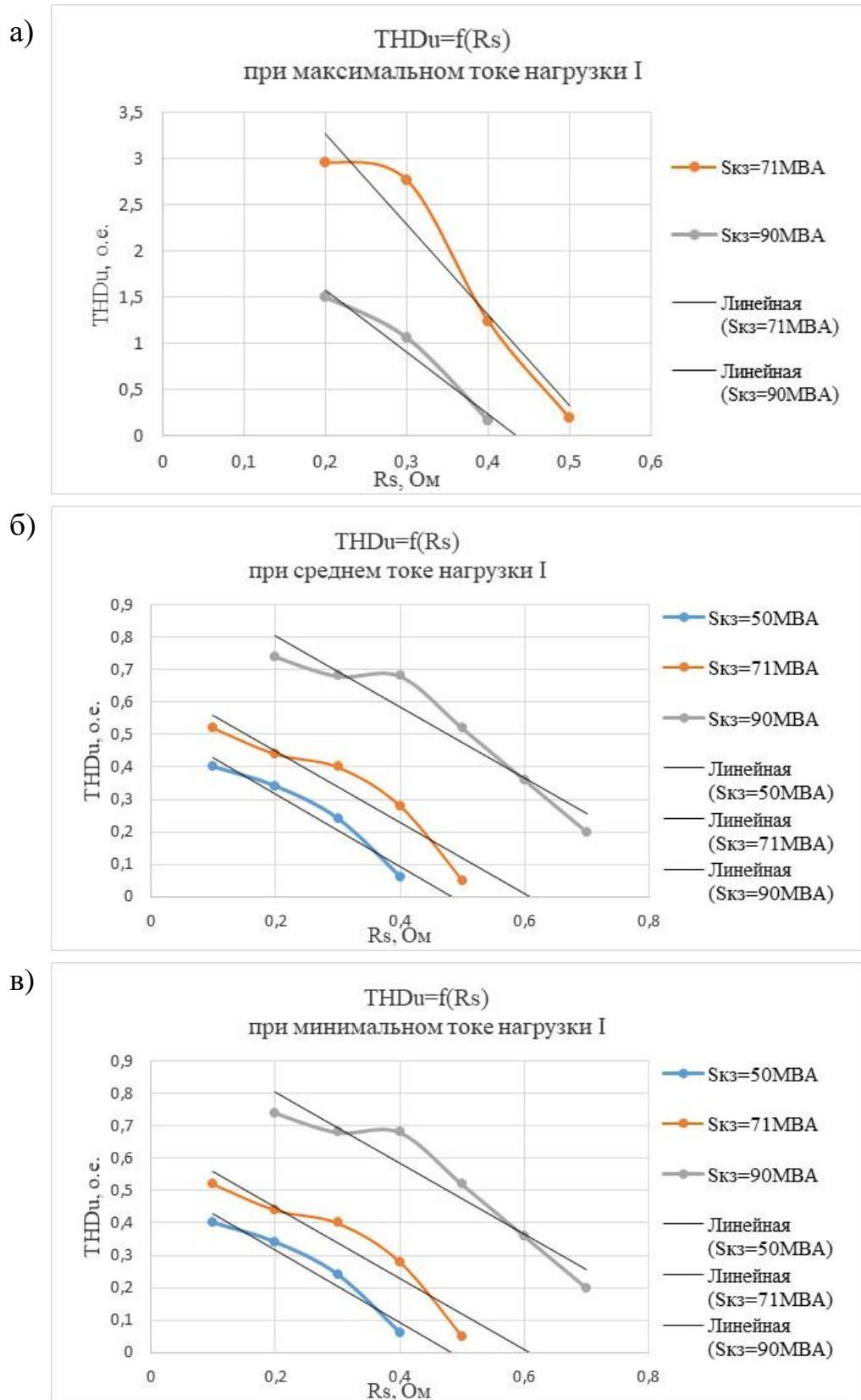


Рисунок 2.2 – Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от активного компонента модуля полного сопротивления при токе нагрузки: а) максимальном; б) среднем; в) минимальном

Из графиков, представленных на рисунке 2.2 следует:

- 1) суммарный коэффициент искажения по напряжению зависит от вклада активного сопротивления, входящего в состав полного сопротивления системы;
- 2) при увеличении вклада активного компонента в модуль полного сопротивления суммарный коэффициент искажения по напряжению уменьшается;
- 3) чем выше значение тока нагрузки, тем более резкий характер изменения суммарного коэффициента искажения от активной составляющей модуля полного сопротивления;
- 4) полученные зависимости сохраняют свой характер изменения при различных фиксированных значениях модуля полного сопротивления;
- 5) неучет  $k_Z^{(I)}$  может привести к разнице  $THD_U$ , оцениваемой до 300%.

Поскольку активная составляющая входит в коэффициент отношения составляющих полного сопротивления  $k_Z^{(I)}$ , то можно более наглядно представить зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от этого показателя (рисунок 2.3).

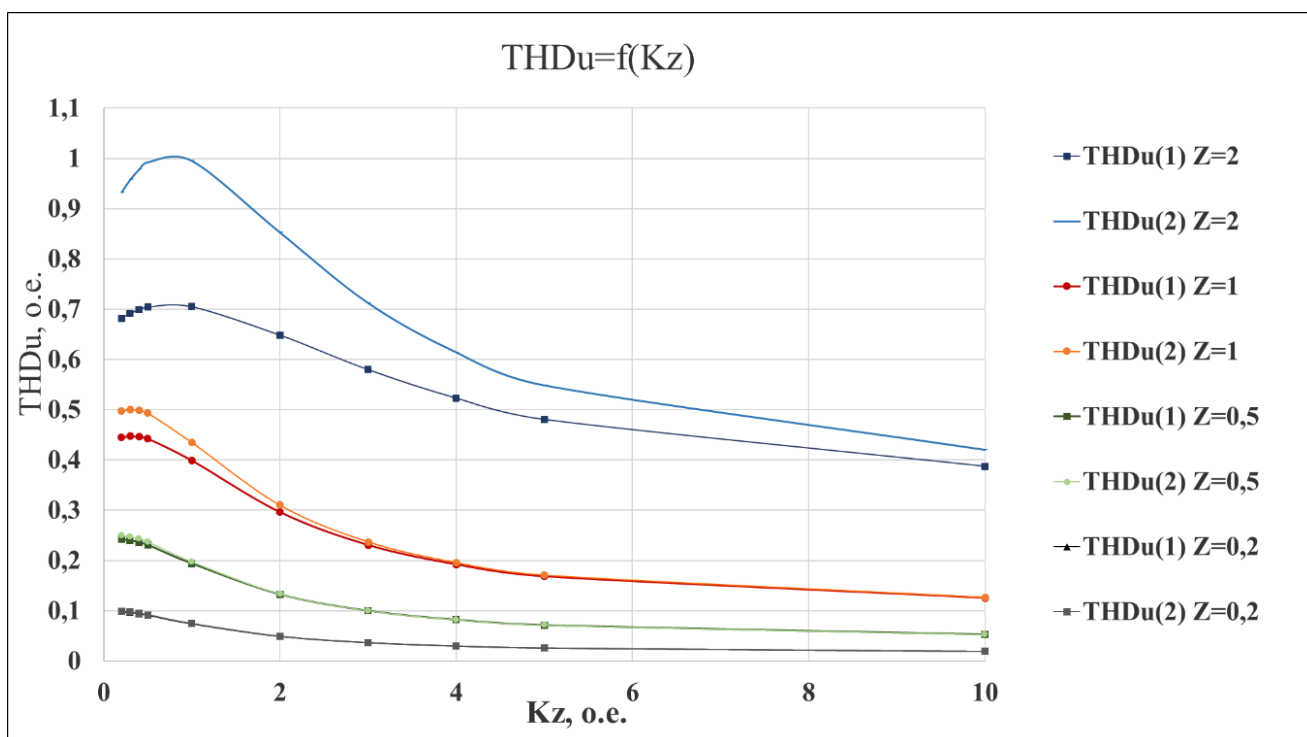


Рисунок 2.3 – Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от коэффициента отношения составляющих полного сопротивления

Также, как и на предыдущих графиках (рисунок 2.2), зависимость проявляется следующим образом:

1) на основной частоте при малых значениях  $k_Z^{(I)}$  больше проявляется реактивный характер сети, что ведёт к возрастанию значения суммарного коэффициента искажения по напряжению. При значениях коэффициента отношения составляющих полного сопротивления до 5 о.е. разница значений  $THD_U$  и при значениях модуля полного сопротивления до 1  $THD_U$  может различаться в 2 раза;

2) при увеличении  $k_Z^{(I)}$  наблюдается выравнивание графика суммарного коэффициента искажения по напряжению: при значении модуля полного сопротивления после 5 о.е. при любых значениях модуля полного сопротивления  $THD_U$  меняется незначительно (1,2 раза).

Таким образом, при оценке суммарного коэффициента искажения по напряжению необходимо учитывать не только модуль полного сопротивления системы, но и соотношение его компонентов – активного и реактивного сопротивлений:

Действующие стандарты не принимают во внимание данный аспект, что является их недостатком.

## **2.2 Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от мощности короткого замыкания**

**Эксперимент №2** направлен на решение следующих задач:

1) выявление зависимости между суммарным коэффициентом искажения по напряжению и мощностью короткого замыкания. Характер зависимости позволит сделать вывод о справедливости замены мощности короткого замыкания на модуль полного сопротивления при определении суммарного коэффициента искажения по напряжению;

2) определение условий, в которых возможно применение различных формул расчета суммарного коэффициента искажения по напряжению  $THD_U$ .

Условия эксперимента совпадают с условиями из эксперимента №1.



Ход эксперимента: исходя из дано, в результате получен массив данных вида, представленного в таблице 2.1, где в каждой ячейке на пересечении  $k_Z^{(I)}$  и  $R_S$  находятся значения искомым параметров сети и суммарного коэффициента искажения по напряжению  $THD_U$ .

Таблица 2.1 – Массив данных с результатами эксперимента

$k_Z^{(I)}$	$R_S, \text{ Ом}$		
	min	...	max
0,2	знач	знач	знач
...	знач	знач	знач
10	знач	знач	знач

Описание схемы:

1. Как и в эксперименте 1, синусоидальное напряжение среднего уровня генерируется источником в 6 кВ ( $U$ ); полное сопротивление системы содержит активный и реактивный компоненты ( $R_S, X_S$ );
2. Нагрузка сети заключена в блоке Subsystem, включает линейную и нелинейную составляющие (рисунок 2.5). По условию эксперимента значения и соотношения могут варьироваться;

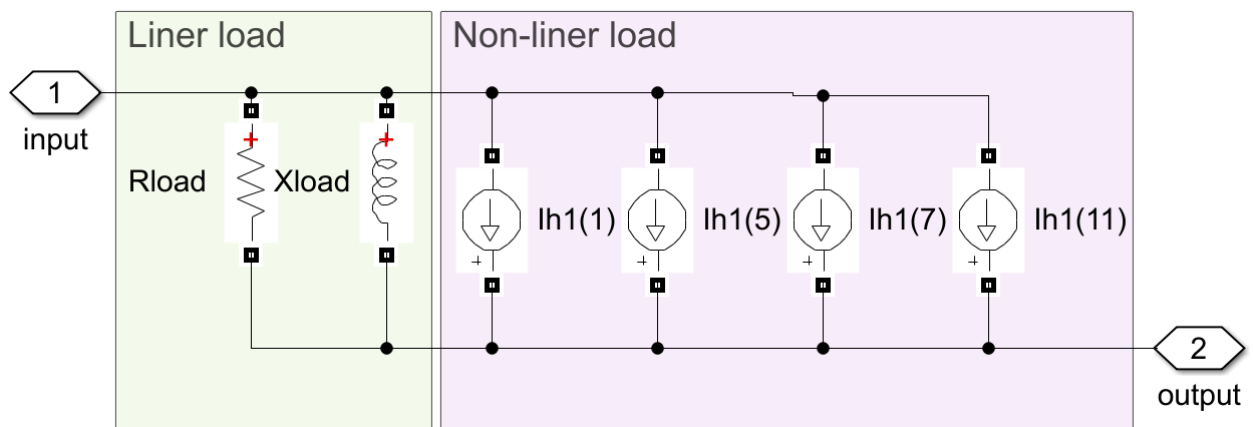


Рисунок 2.5 – Содержание блока нагрузки Subsystem

3. Два блока для измерения параметров тока Current Measurment1,2 и параметров напряжения measUload1,2;
4. Блоки измерения среднеквадратичных значений тока в линии и напряжения на нагрузке RMS, а также блоки измерения суммарного коэффициента искажения THD по току и напряжению, согласно выражениям (1.28) и (1.29);

5. Система блоков  $estY$ ,  $Gain$ ,  $recmodI$ ,  $recphaseI$  (рисунок 2.6) служит для оценки, расчета и записи в память программы модуля и фазы тока в линии и напряжения на нагрузке;

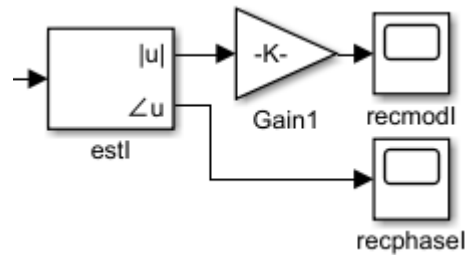


Рисунок 2.6 – Система блоков оценки характеристик тока и напряжения

6. Блоки расчета значений гармонических составляющих тока линии и напряжения на нагрузке  $hhI$  и  $hhU$  (рисунок 2.7). Блок расчета гармоник напряжения по структуре аналогичен блоку расчета гармоник тока;

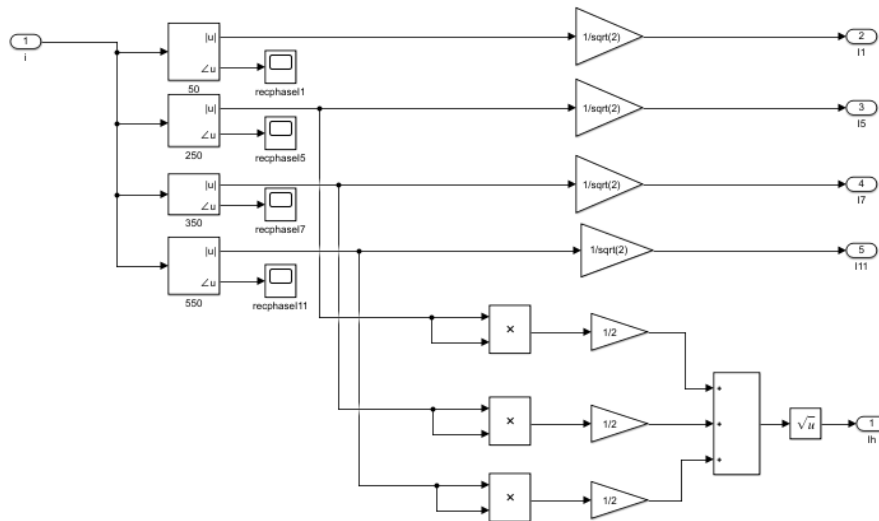


Рисунок 2.7 – Блок расчета гармонических составляющих тока

7. Все блоки с пометкой  $show...$  отображают результаты измерений в режиме онлайн в процессе моделирования и служат для оперативного контроля измерений;
8. Все блоки с пометкой  $rec...$  служат для записи в память программы обозначенных параметров, например, как в пункте 6 описания схемы.

Запись и вывод массива данных из MatLab Simulink осуществляется в окне Editor, путём написания алгоритма расчёта значений. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2.8.

В рамках цикла for...end значения исходных параметров вносятся через функцию вида  $R_s(k)=W(k,1)$ , а вывод расчетных значений осуществляется через функцию вида  $M(k, 1)=mean(THDi(end-50:end,2))$ .

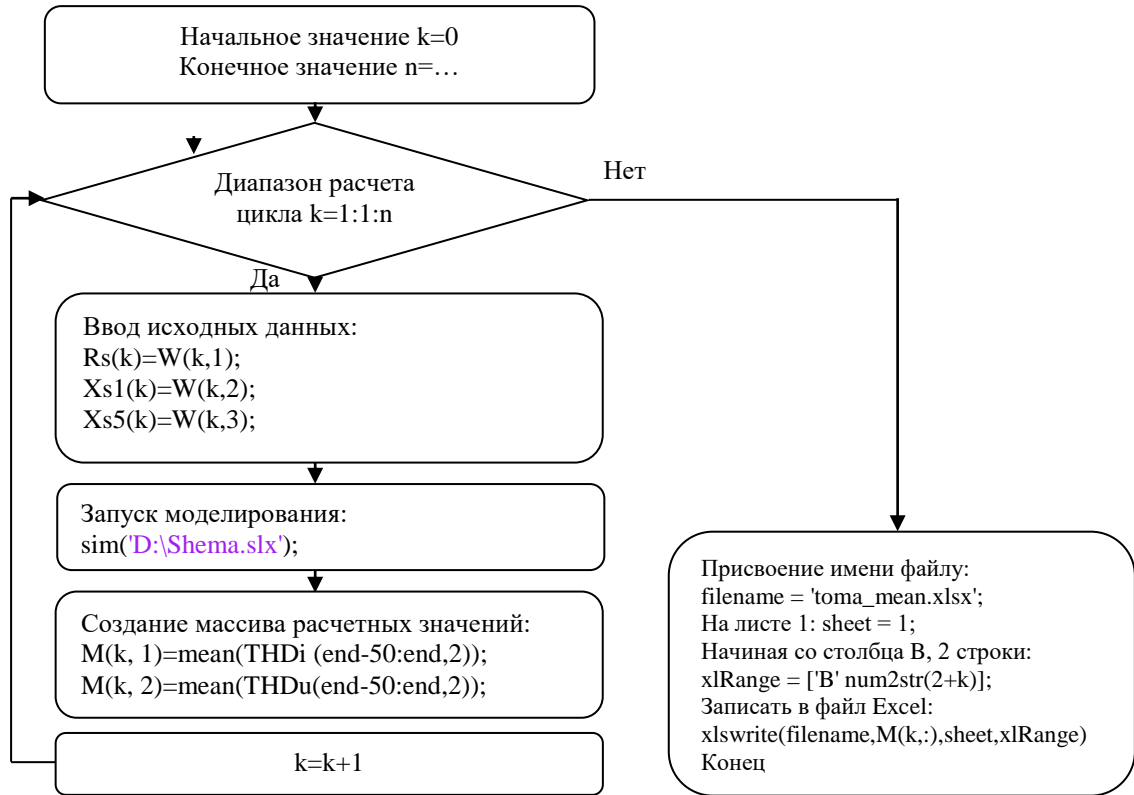


Рисунок 2.8 – Блок-схема алгоритма расчёта параметров схемы

Дополнительная проверка расчетов осуществляется в среде Excel для сверки значений, полученных из моделирования в среде MatLab Simulink. Пример расчёта для блока данных при  $R_s=0,1 \text{ Ом}$ ,  $k_Z^{(1)}=1$ .

Первым шагом определяется значение реактивной составляющей полного сопротивления (2.9)

$$X_s^{(1)} = R_s^{(1)} / k_Z^{(1)}. \quad (2.9)$$

Затем идет вычисление модуля  $Z$  (2.10) и разности фаз между напряжением и током  $\varphi$  (2.11) полного сопротивления:

$$Z_s^{(1)} = \sqrt{R_s^{(1)2} + X_s^{(1)2}}, \quad (2.10)$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_s}{R_s}. \quad (2.11)$$

Значения гармонических составляющих определяются номером гармоники согласно выражению (2.4); падение напряжения в линии  $\Delta \dot{U}_h$  определяется на каждой гармонике отдельно, исходя из величины тока и сопротивления (2.5); напряжение на нагрузке  $\dot{U}_L$  рассчитывается с учётом падения напряжения в общей линии (2.6).

Для анализа влияния соотношения компонентов полного сопротивления системы и оценки доли вклада в это влияние величины активного компонента сопротивления рассматривается режим короткого замыкания.

Величина тока  $\dot{I}_{sc}$  и мощности  $\dot{S}_{sc}$  короткого замыкания рассчитывается по следующим формулам (2.7) и (2.8).

Суммарные коэффициенты искажения по напряжению рассчитываются по формуле (1.4), где деление производится на напряжение на основной частоте (на рисунке 2.9 обозначено как  $THDu(1)$ ), а также по формуле (1.29), где деление производится на действующее напряжение (на рисунке 2.9 обозначено как  $THDu$ ).

Аналогичный цикл расчетов проводится для остальных значений  $R_s$  и  $k_Z^{(1)}$ .

Результатом эксперимента являются графики зависимости суммарного коэффициента искажения по напряжению от полной мощности короткого замыкания (рисунок 2.9).

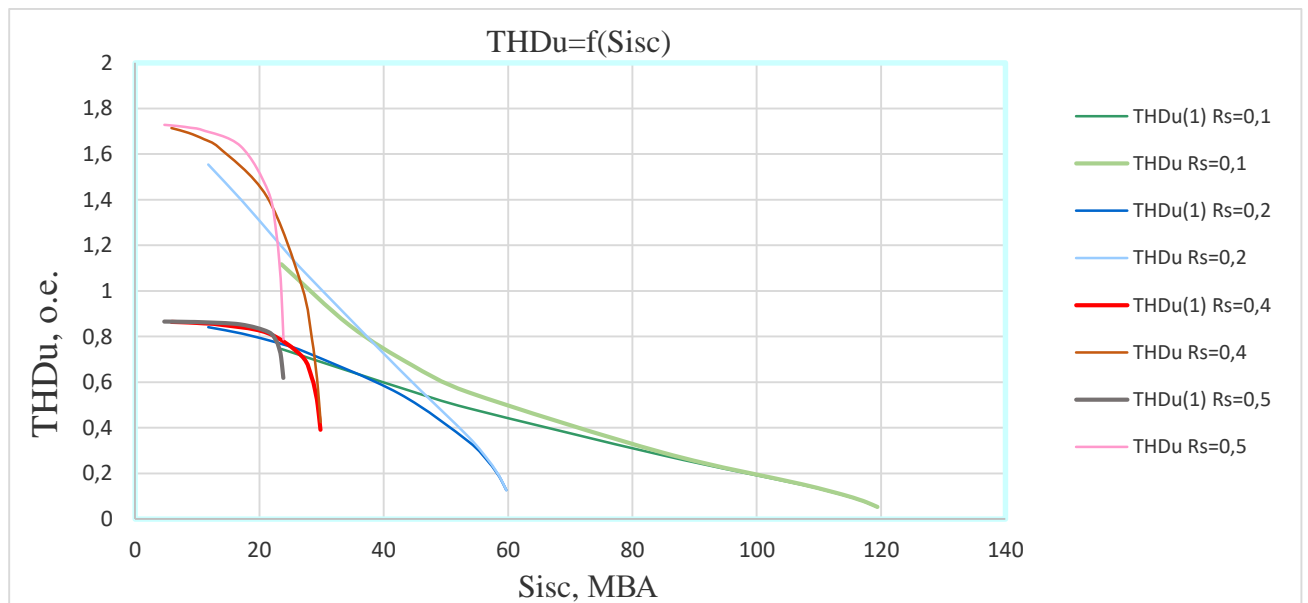


Рисунок 2.9 – Семейство графиков зависимости  $THDu$  от мощности короткого замыкания

Для анализа графиков необходимо учитывать, что относительно оси абсцисс слева направо модуль полного сопротивления уменьшается, коэффициент полного сопротивления  $k_Z^{(I)}$  увеличивается, так как увеличивается величина реактивной составляющей [12].

Таким образом, из представленных на рисунке 2.9 графиков, следует:

1) при расчёте суммарного коэффициента искажения напряжения по формулам (2.7) и 2.8) его значения отличаются менее, чем на 5% при малых значениях  $R_s$  (до 0,3 Ом) и при соотношении активной составляющей полного сопротивления к реактивной  $k_Z^{(I)}$  равном и выше 1. С увеличением значения  $R_s$  корреляция результатов определения суммарного коэффициента искажения по формулам (1.4) и (1.30) становится слабее и тем хуже, чем ниже величина коэффициента  $k_Z^{(I)}$ . На промежутке значений  $R_s$  с 0,3 до 0,7 наблюдается ухудшение корреляции значений, а после 0,7 при максимально большом значении коэффициента  $k_Z^{(I)}$  значения вновь сближаются по уровню.

По итогу, практически независимо от величины  $R_s$  при уменьшении коэффициента  $k_Z^{(I)}$  (что означает увеличение разности фаз между напряжением и током при полном сопротивлении) значения суммарных коэффициентов искажения имеют сильное расхождение, которое в среднем составляет 50% (рисунок 2.10).

Параметр «точность»  $T$ , представленный на графике рисунка 2.10 рассчитан по формуле (2.12)

$$T = \frac{THDu(1)}{THDu} * 100\% \quad (2.12)$$

Связывая полученные результаты с током и мощностью короткого замыкания, речь идет о полном соответствии картины происходящего, поскольку характер изменения этих параметров совпадает с характером изменения коэффициента полного сопротивления  $k_Z^{(I)}$ .

2) в рамках одной и той же формулы при фиксированном значении модуля полного сопротивления, но при изменении соотношения его компонентов в коэффициенте  $k_Z^{(I)}$  наблюдаются погрешности измерений. Например, при расчете суммарного коэффициента искажения по напряжению  $THDu$  при максимальном значении  $k_Z^{(I)}$  при активном сопротивлении системы  $R_s=0,5$  Ом погрешность составляет 20%, а при  $R_s=0,2$  Ом погрешность составляет 65%.

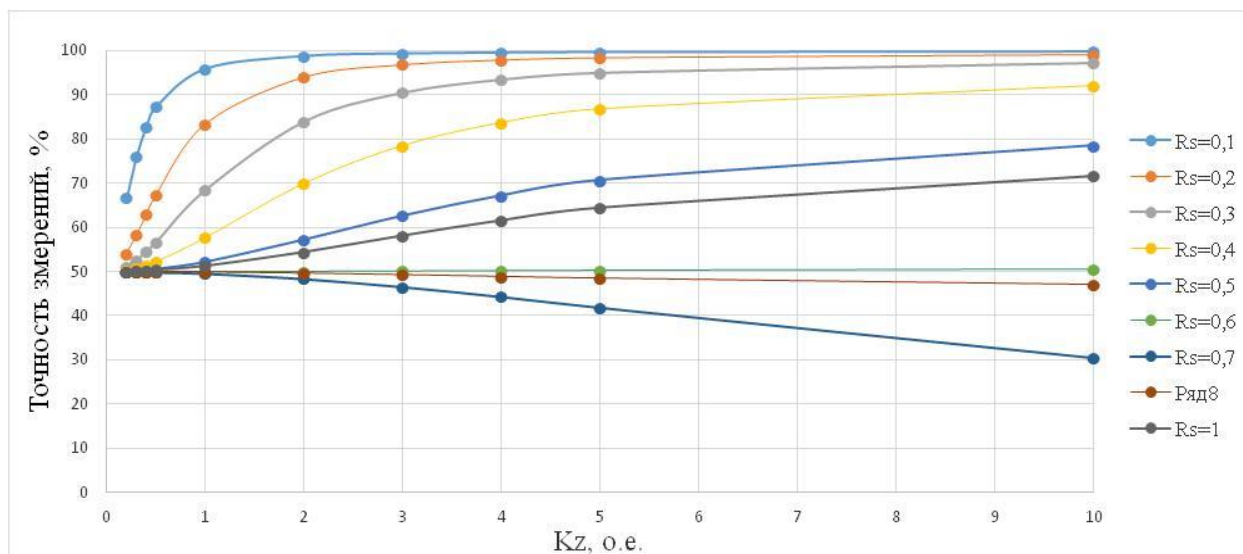


Рисунок 2.10 – Точность расчета суммарного коэффициента искажения напряжения различными формулами

3) в рамках одной и той же формулы при фиксированном значении модуля полного сопротивления, но при изменении соотношения его компонентов в коэффициенте  $k_Z^{(I)}$  наблюдаются погрешности измерений. Например, при расчете суммарного коэффициента искажения по напряжению  $THDu$  при максимальном значении  $k_Z^{(I)}$  при активном сопротивлении системы  $R_s=0,5$  Ом погрешность составляет 20%, а при  $R_s=0,2$  Ом погрешность составляет 65%.

4) если провести параллель к оси абсцисс, то получится срез значений мощности короткого замыкания, которая будет значительно расходиться при одном и том же значении  $THDu$ . Это также говорит о том, что нельзя делать обратных суждений в отношении величины мощности или тока короткого замыкания, опираясь только на модульное значение, и необходимо осуществлять учет по формуле (1.30).

Рассматривая графики отдельных случаев эксперимента также наблюдается зависимость между суммарным коэффициентом искажения по напряжению  $THDu$  и соотношением  $k_Z^{(I)}$  (рисунок 2.11).

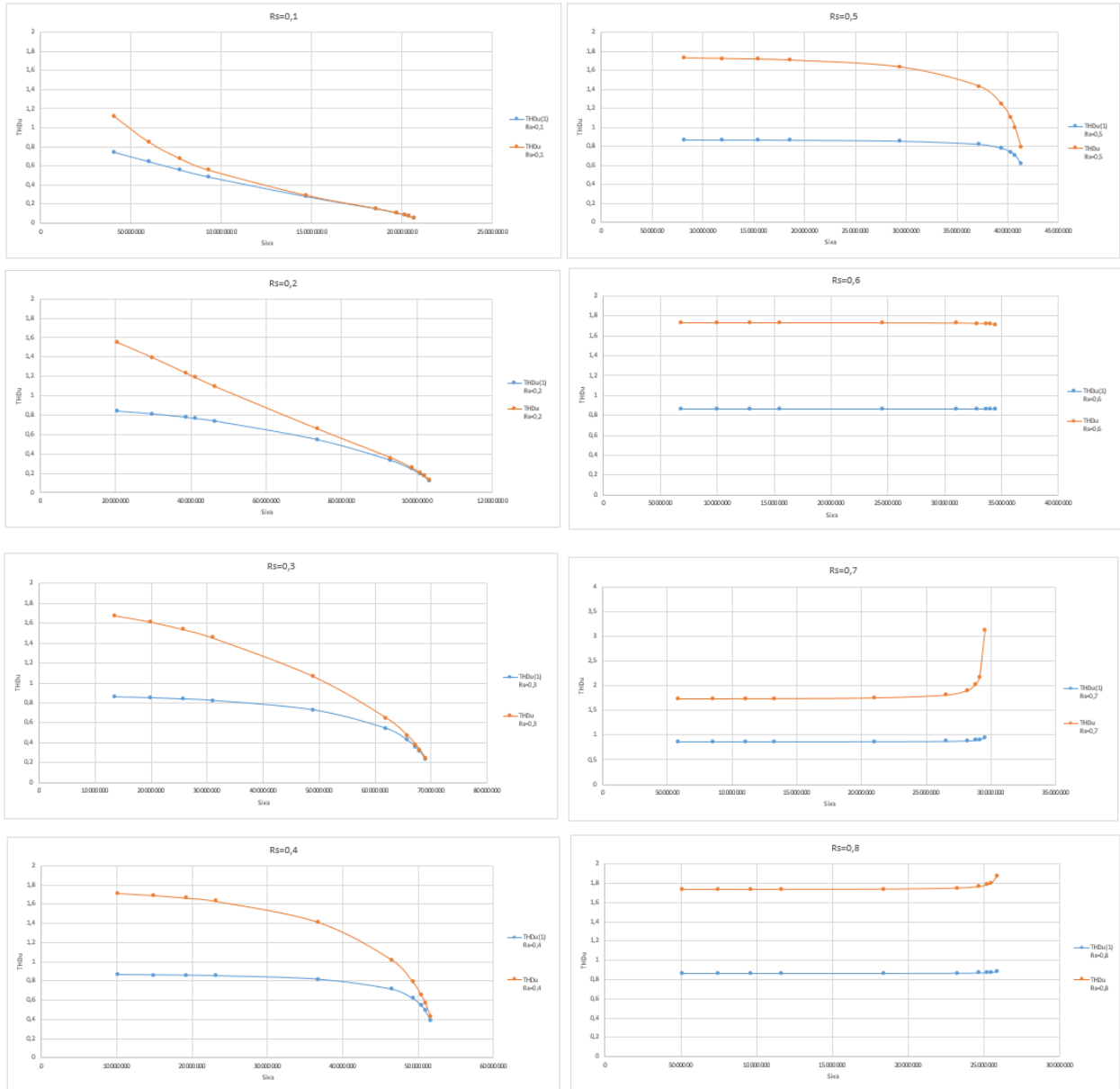


Рисунок 2.11 – Частные случаи влияния составляющих полного сопротивления на несинусоидальность сети

Анализ графиков, представленных на рисунке 2.11, показывает, что при расчете суммарного коэффициента искажения по формуле (1.30) менее явно выражен характер изменения соотношения активного и реактивного компонентов полного сопротивления. При низких значениях  $R_s$  разница в величине  $THDu$  при

подсчете формулами (1.4) и (1.29) незначительна, но с увеличением  $R_s$  значения резко расходятся.

Выводы:

При оценке несинусоидальности напряжения возможно равноценное применение формул (1.4) и (1.29) только при определенных условиях: при малых значениях  $R_s$  (в данном случае до 0,3 Ом) и при соотношении активной составляющей полного сопротивления к реактивной  $k_Z^{(I)}$  равном и выше 1.

Модуль тока короткого замыкания и модуль полной мощности короткого замыкания увеличиваются при уменьшении полного сопротивления короткого замыкания, также, как и коэффициент полного сопротивления  $k_Z^{(I)}$ . Поскольку значения суммарного коэффициента искажения напряжения  $THDu$  менялись и имели различную корреляцию в рамках формул (1.4) и (1.30), то это говорит о зависимости суммарного коэффициента искажения напряжения от величины разности фаз, поскольку коэффициент  $k_Z^{(I)}$  отражает её изменение. Причём, погрешность возникает как при оценке различными формулами (в среднем составляет порядка 50%), так и в рамках применения одной и той же формулы при интервале изменения  $R_s$  от 0,1 до 0,6 может достигать порядка 30%.

Таким образом, необходимо учитывать влияние  $R_s$ , так как при одном и том же соотношении  $k_Z^{(I)}$  получены различные характеристики. Так, при увеличении  $R_s$  наблюдается снижение мощности короткого замыкания. Причём, чем выше величина  $R_s$ , тем менее точным получается учет несинусоидальности по напряжению.

Также, необходимо учитывать не только модуль полного сопротивления короткого замыкания, но и его фазу, то есть коэффициент отношения его компонентов  $k_Z^{(I)}$ .

При оценке такого показателя качества электрической энергии, как суммарный коэффициент искажения напряжения, необходимо учитывать вклад активной составляющей сопротивления системы (определяемых расчетным путем

[19], так как при различной величине  $R_s$  необходимо корректировать учёт  $THDu$ . Также необходимо учитывать соотношение активного и реактивного компонентов полного сопротивления системы, поскольку при одном и том же соотношении в сети может наблюдаться различная по величине мощность короткого замыкания. Данный аспект говорит о том, что нельзя проводить оценку несинусоидальности, основываясь только на величине мощности короткого замыкания.

Таким образом, для корректной оценки показателей качества электроэнергии, как следствие, настройке оборудования, работающего в условиях несинусоидальности, необходимо руководствоваться не только характеристиками сети, имеющими прямое отношение к искажениям (например, расчет компонентов гармонических составляющих напряжения и тока), но также учитывать влияние соотношения компонентов сопротивления системы  $k_Z^{(1)}$  и вклада активной составляющей  $R_s$ .

В таком ключе работа приобретает интерес не только в техническом, но и экономическом аспекте, поскольку помогает точнее оценить величину искажений в сети, а также данное влияние может быть учтено при выявлении основного источника искажений и его вклада в ухудшение качества электроэнергии в отношении несинусоидальности.

### 2.3 Выводы по Главе 2

Суммарный коэффициент искажения по напряжению  $THDu$  зависит от мощности короткого замыкания. При увеличении мощности короткого замыкания  $S_{isc}$  значение суммарного коэффициента искажения по напряжению уменьшается и зависимость проявляется слабее. Таким образом, после определенного уровня мощности при различном значении активного компонента полного сопротивления системы изменение  $THDu$  лежит в диапазоне 10%, в то время как до определенного уровня может меняться в диапазоне 60%).

Зависимость от мощности короткого замыкания ведет к выводу о зависимости  $THDu$  от модуля полного сопротивления системы, что подтверждается результатами исследования. Причем суммарный коэффициент искажения по напряжению  $THDu$  зависит не только от модуля сопротивления

системы, но и отношения его активной и реактивной составляющих. Для учёта данного отношения введён коэффициент соотношения компонентов сопротивления системы  $k_Z^{(I)}$ . При увеличении коэффициента  $k_Z^{(I)}$  усиливается влияние активной составляющей полного сопротивления, что ведёт к снижению значения суммарного коэффициента искажения по напряжению. Полученная зависимость сохраняется и в условиях изменения тока нагрузки и полной мощности короткого замыкания. Неучет показателя  $k_Z^{(I)}$  может привести к ошибке в 300%.

Расчёт суммарного коэффициента искажения по напряжению может вестись путём деления на действующее значение напряжения только при определенных условиях. При малых значениях модуля полного сопротивления системы (до 1 Ом) разница расчёта по различным формулам не превышает 2% на всём диапазоне изменения коэффициента  $k_Z^{(I)}$ . Чем меньше значение указанного коэффициента и больше модуль полного сопротивления системы, тем больше разница в значениях и эквивалентная замена формулы из стандарта не допустима.

## ГЛАВА 3 УЧЕТ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НАЛИЧИИ ИСКАЖЕНИЙ

Несинусоидальный режим работы вносит коррективы в измерение мощности приборами учёта электроэнергии. Помимо погрешностей измерений, обусловленных физической стороной процесса (принцип, на котором построена работа устройства, например, эффект Холла или катушка Роговского), возникают погрешности от математического аппарата, закладываемого в обработку сигналов тока и напряжения.

### 3.1 Особенность учета электроэнергии при синусоидальном режиме

Независимо от режима потребления электроэнергии полная мощность  $S$  (ВА), которую также называют «кажущейся», находится по универсальной формуле (3.1)

$$S = UI, \quad (3.1)$$

где  $U$  (В) – действующее значение полного напряжения рассматриваемого участка сети;  $I$  (А) – действующее значение полного тока рассматриваемого участка сети.

В зависимости от условий, полная мощность может раскладываться на различное количество составляющих. Можно выделить 4 основных типа условий, характерных для промышленных сетей предприятий (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Режимы работы трехфазной сети переменного тока

Характеристики/Режимы	Соотношение нагрузки в фазах обусловлено (не)равенством нагрузки в разных фазах	
	Форма сигнала обусловлена (не)линейностью нагрузки	симметричный синусоидальный
симметричный несинусоидальный		несимметричный несинусоидальный

Симметричный синусоидальный режим является идеальным и в трехфазных сетях промышленных предприятий практически не встречается. В таких условиях полная мощность раскладывается на две составляющие (3.2)

$$S^2 = P^2 + Q^2 = (UI\cos\varphi)^2 + (UI\sin\varphi)^2, \quad (3.2)$$

где  $P$  ( $Вт$ ) – активная мощность;  $Q$  ( $вар$ ) – реактивная мощность;  $\varphi$  ( $град$ ) – разность фаз между начальными фазами напряжения и тока (аргумент полного сопротивления).

Несимметричные синусоидальный и несинусоидальный режимы встречаются чаще и представляют сложность для работы приборов учета электроэнергии. Но прежде чем переходить к анализу подходов к учету электроэнергии в этих режимах, необходимо рассмотреть промежуточный и широко распространенный в промышленных предприятиях симметричный несинусоидальный режим работы сети.

Как указано в таблице 3.1, данный режим возникает в сетях с нелинейным характером нагрузки. К таким видам нагрузки относятся силовое электрооборудование с тиристорным типом управления, частотно-регулируемый электропривод установки (преобразователи частоты), вычислительная техника, дуговые и индукционные электропечи, осветительные системы и многое другое.

### 3.2 Подходы к учету электроэнергии

Существует множество подходов к учету электроэнергии при несинусоидальном режиме и оживленные дискуссии ведутся до сих пор.

Первыми авторами, кто отметил необходимость уточнения расчета мощности стали С.Р. Steinmetz (1900) и М. Пiovic (1925). Затем свой значительный вклад в развитие теории внесли С.И. Budeanu (1927) и S. Fryze (1932). Далее, наиболее широкое распространение получили подходы к учету мощности авторов, которые совершенствовали эти две базовые концепции: P.S. Filipski (1980,1984,1994); А.Е. Emanuel (1974-2012); W. Shepherd и P. Zakikhani (1972); D. Sharon (1973); W.J.M. Moore и N.L. Kusters (1980); С.Н. Page (1980); Н. Akagi и др. (1984); M. Depenbrock, D.A. Marshal и J.D. van Wyk (1993); E. W. Kimbark (1995); F.D. Yildirim и W. Fuchs (1999); L.S. Czarnecki (1987-2018), P. Tenti (2003). На данный момент в действующем стандарте качества электроэнергии ГОСТ 32144-2013 (IEEE. Standard 1459-2010. IEEE Power and Energy Society)

учитываются наработки А.Е. Emanuel. Из российских учёных вклад внесли Железко Ю.С., Жемеров Г.Г., Жежеленко И.В., Розанов Ю.К., Смирнов С.С.

Однако ни в стандартах, ни в работах перечисленных авторов не рассмотрено влияние параметров электрической сети в части соотношения линейной к нелинейной нагрузке и влияния полного сопротивления системы на выбор методики, применяемой для учета электроэнергии в электрических сетях с искажениями.

Во всех анализируемых подходах к учету мощности полная мощность раскладывается на различные составляющие (таблица 3.2). Неизменной остается только активная мощность  $P$ , которая для периодического тока произвольной формы определяется как средняя мощность за период (3.3)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt . \quad (3.3)$$

Остальные же мощности авторы называют и рассчитывают по-разному (таблица 3.2). В стандарте предлагается использовать термин «неактивная мощность»  $N$ , который является корнем из разности полной и активной мощностей [81] (3.4)

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} . \quad (3.4)$$

В некоторых методах неактивная мощность равна реактивной, в некоторых является суммой разных видов мощностей, например, реактивной и мощности искажений. Подробнее содержание формул расчета компонентов мощности представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Анализируемые подходы к учету электроэнергии

Авторы теорий	Полная мощность	Другие виды мощности
S. Fryze (Фризе)	$S^2 = P^2 + Q_F^2$ $S^2 = (UI_a)^2 + (UI_r)^2$ $Q_F$ – реактивная мощность	$S = UI$ $P = UI_a = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$ $Q_F = UI_r = UI_F$ $Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(UI)^2 - (UI_a)^2}$

## Продолжение таблицы 3.2

C.I. Budeanu (Будяну/ Будеану)	$S^2 = P^2 + F^2$ $S^2 = P^2 + Q_B^2 + D^2$ <p>F-фиктивная/ добавочная мощность;  <math>Q_B</math> – реактивная мощность;  <math>D</math> – мощность искажения</p>	$P = \sum_n U_n I_n \cos \varphi_n$ $Q_B = \sum_n U_n I_n \sin \varphi_n$ $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2}$ $F = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{Q_B^2 + D^2}$ $D = \sqrt{\sum_{m=1}^{h-1} \sum_{n=m+1}^h U_m^2 I_n^2 + U_n^2 I_m^2 + U_m I_m U_n I_n \sin(\varphi_m - \varphi_n)}$
W. Shepherd & P. Zakikhani (Шепард и Закихани)	$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2$ <p><math>S_R</math> – полная активная мощность;  <math>S_X</math> – полная реактивная мощность;  <math>S_D</math> – полная мощность искажения.</p>	$S_R = \sqrt{\sum_1^n U_n^2 \sum_1^n I_n^2 \cos^2 \varphi_n}$ $S_X = \sqrt{\sum_1^n U_n^2 \sum_1^n I_n^2 \sin^2 \varphi_n}$ $S_D = \sqrt{\sum_1^n U_n^2 \sum_1^z I_z^2 + \sum_1^u U_u^2 (\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^z I_z^2)}$
N.L.Kusters & W.J.W. Moore (Кастерс и Мур)	$S^2 = P^2 + Q^2$ $S^2 = P^2 + Q_C^2 + Q_{Cr}^2$ $S^2 = P^2 + Q_L^2 + Q_{Lr}^2$ <p><math>Q</math> – реактивная мощность;  <math>Q_C, Q_L</math> – емкостная/ индуктивная реактивные мощности;  <math>Q_{Cr}, Q_{Lr}</math> – остаточные емкостная/ индуктивная реактивные мощности.</p>	$P = UI_p = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$ $Q_C = UI_{qC} = \frac{U}{U_{der}} \frac{1}{T} \int_0^T u_{der} i dt$ $Q_L = UI_{qL} = \frac{U}{U_{iml}} \frac{1}{T} \int_0^T u_{iml} i dt$ $Q_{Cr} = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_C^2}$ $Q_{Lr} = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_L^2}$ $Q = \sum_1^n \frac{1}{n} U_n I_n \sin \varphi_n \cdot \sqrt{\frac{\sum_1^n U_n^2}{(\sum_1^n U_n^2 / n)}}$
D. Sharon (Шарон)	$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2$ <p><math>S_Q</math> – квадратурная реактивная мощность;  <math>S_C</math> – добавочная реактивная мощность.</p>	$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$ $S_q = U_n \sqrt{\sum_1^n I_n^2 \sin^2 \varphi_n}$ $S_c = \sqrt{S^2 - P^2 - S_q^2}$
E. Kimbark (Кимбарк)	$S^2 = P^2 + Q_k^2 + D_k^2$ <p><math>Q_k^2 + D_k^2</math> – деактивная мощность;  <math>Q_k</math> – реактивная мощность;  <math>D_k</math> – мощность искажения.</p>	$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$ $Q_k = U_1 I_1 \sin \varphi_1$ $D_k = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_k^2}$

## Продолжение таблицы 3.2

IEEE 1459-2010 (Международный стандарт)	$S^2 = S_I^2 + D_I^2 + D_U^2 + S_H^2$ $S^2 = S_I^2 + S_N^2$ $S^2 = P^2 + N^2$ $S_I$ – фундаментальная полная мощность; $S_N$ – нефундаментальная полная мощность; $S_H$ – полная мощность искажения; $D_I$ – мощность искажения по току; $D_U$ – мощность искажения по напряжению; $N$ – неактивная мощность; $D_H$ – мощность искажения.	$S_I = U_I I_I = \sqrt{P_I^2 + Q_I^2}$ $P_I = U_I I_I \cos \varphi_I$ $Q_I = U_I I_I \sin \varphi_I$ $D_U = U_H I_I = S_I THD_U$ $D_I = U_I I_H = S_I THD_I$ $S_H = U_H I_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} = S_I THD_I THD_U$ $D_H = \sqrt{S_H^2 + P_H^2}$ $S_N = \sqrt{S^2 - S_I^2} = \sqrt{D_I^2 + D_U^2 + S_H^2}$ $N = \sqrt{S^2 - P^2}$ $P = P_I + P_H$ $P_H = U_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \varphi_h$
--	--	--

В качестве ключевого подхода выбран принцип, основанный на разделении полной мощности на две составляющие: активная и неактивная мощность, поскольку данные определения могут включать в себя остальные упомянутые компоненты мощности.

Резюме:

- 1) Различные подходы к расчету компонентов полной мощности в результате представляют комбинацию вариантов, которые можно систематизировать, включив все активные составляющие в компонент активной мощности, а все остальные к неактивной, включая мощность искажения и реактивную мощность.
- 2) Принимая во внимание вышеизложенные проблемы учета электроэнергии в электрических сетях при наличии искажений, а также принципы различных подходов к учету электроэнергии, представляется необходимым решение задачи по выявлению особенностей каждого из подхода в зависимости от параметров сети.

### 3.3 Применение сертифицированных применяемых приборов учёта электроэнергии

На данный момент ответственность за ненадлежащее качество электроэнергии между субъектами рынка электроэнергетики закреплена в ряде нормативно-правовых документов [30], но в некоторых регионах России наблюдается практика, при которой требования ГОСТ 32144-2013 не выполняются, а к ответственным за ухудшение качества электроэнергии не применяются соответствующие меры. Однако, действует постановление правительства об оплате за реактивную энергию [32].

Несмотря на формальное наличие требований к обеспечению установленных значений соотношения потребления активной и реактивной мощностей [29], фактически в последние годы произошло разрушение механизма скидок/надбавок к тарифу на электроэнергию [30] за нарушения режимов потребления реактивной мощности [16]. Анализ договорных отношений и параметров электропотребления на ряде предприятий Санкт-Петербурга подтверждает указанные выводы.

Дополнительным фактором, не способствующим повышению качества электроэнергии в России в настоящее время является отсутствие утвержденных методик, позволяющих определить виновника нарушения показателей качества электрической энергии, например, по показателям, относящимся к изменению гармонического состава питающего напряжения [47]. Возникает ситуация, где «чистые» потребители, которые не вносят искажений в напряжение питания, получают «загрязненную» электроэнергию из-за мощной нелинейной нагрузки энергообъектов со стороны, присоединенных к точке общего подключения потребителей (как было показано в 1 главе диссертации, в стандартах отсутствуют ограничения в этом отношении). Наиболее часто такая ситуация возникает в сетях, где в качестве потребителей выступают предприятия алюминиевой и крупной металлургической промышленности.

Для многих предприятий в структуре себестоимости производимого продукта одной из основных составляющих являются затраты на электроэнергию [29]. Параметры электропотребления на вводе предприятия при наличии

гармонических искажений в напряжении и токе могут изменяться как в меньшую, так и в большую стороны. Это характеризуется в первую очередь сдвигом фаз на высших гармониках между напряжением и током [12].

Как правило, расчет электроэнергии осуществляются с учетом активной и реактивной составляющей мощности. При синусоидальном напряжении и токе различные электронные счетчики дают сравнимые показания по активной и реактивной энергии, в соответствии со своим классом точности. Однако, несмотря на увеличение доли искажений, такие счетчики продолжают использоваться и при возникновении в сетях высших гармоник. Это приводит к ситуации, в которой счетчики регистрируют неверные показания. Поэтому в работе поставлена первая задача по исследованию влияния высших гармоник на фиксируемые параметры электропотребления счетчиками электрической энергии. В первую очередь, это потребление полной, активной и реактивной мощностей.

Как показано в 1 главе, действующие в настоящее время стандарты для счетчиков реактивной энергии относятся к их эксплуатации при синусоидальных напряжениях и токах, а приводимые в них требования по точности приборов не учитывают возможного наличия гармонических искажений [1; 55]. В действующем стандарте ГОСТ 31819.23-2012 (IEC 62053-23:2003) [7] не задается проверка точности измерений при наличии высших гармоник. Стоит отметить, что утративший силу стандарт IEC 61268:1995 предполагал проверку точности счетчиков реактивной энергии при наличии 3 гармоники по току с амплитудой 10 %, но в действующем стандарте ГОСТ IEC 62053-61-2012 [11] это вид испытаний отменен.

Производители электронных счетчиков электрической энергии формируют приборы высокоточными интегральными схемами. Аналоговая часть микросхемы включает аналого-цифровой преобразователь и источник опорного напряжения. Все дальнейшие преобразования сигнала, такие как перемножение и фильтрация, происходят с сигналом в цифровом виде. Функциональная блок-схема микропроцессорного счетчика электроэнергии представлена на рисунке 3.1.

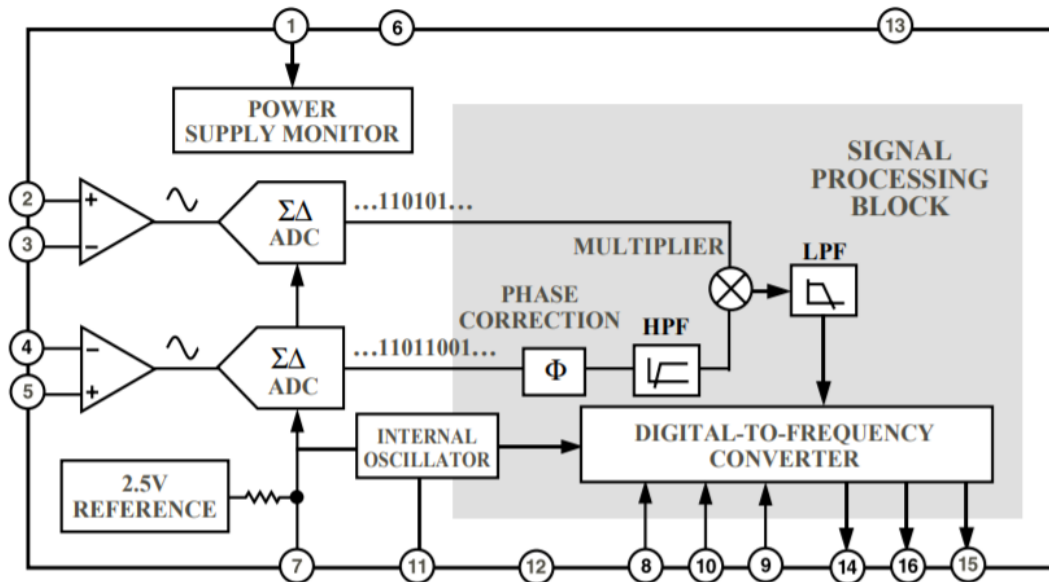


Рисунок 3.1 – Функциональная блок-схема микропроцессорного счетчика электроэнергии

Расчет активной мощности ведется прямым перемножением сигналов напряжения и тока., получая его мгновенное значение.

Причем этот принцип распространяется на сети, работающие в несинусоидальном режиме, который широко распространен в связи с наличием среди потребителей с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Путем преобразования Фурье мгновенные значения напряжений и токов можно представить в виде суммы гармоник. Тогда, значение активной мощности определяется выражением (3.5-3.7):

$$P = P_1 + P_H, \quad (3.5)$$

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad \varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1, \quad (3.6)$$

$$P_H = \sum_{h \neq 1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h, \quad \varphi_h = \alpha_h - \beta_h, \quad (3.7)$$

где  $P_1$ ,  $P_H$  – активная мощность на основной и высших гармониках соответственно;  
 $U_1$ ,  $I_1$  – среднеквадратичные значения напряжения и тока на основной гармонике;  
 $U_h$ ,  $I_h$  – среднеквадратичные значения  $h$ -гармоник напряжения и тока;  
 $\alpha_h$ ,  $\beta_h$  – начальные фазы напряжения и тока на высших гармониках соответственно;  
 $\varphi_1$ ,  $\varphi_h$  – угол сдвига фаз (фазовый угол) между напряжением и токов на основной и высших гармониках.

Реактивная мощность определяется как произведение напряжения и тока, когда один из них сдвинут относительно другого на  $90^\circ$ . Результатом этого произведения является мгновенная реактивная мощность. Среднее значение такой мощности по числу высших гармоник  $h$  определяется выражением (3.8)

$$Q = \frac{1}{hT} \int_0^{hT} q(t) dt = UI \sin(\varphi), \quad (3.8)$$

где  $T$  – период измерения, с;

$q$  – мгновенная реактивная мощность, вар;

$U, I$  – среднеквадратичные значения напряжения и тока.

Блок-схема измерения реактивной мощности представлена на рисунке 3.2. Следует отметить, что фильтр с фазовым сдвигом имеет неединичную АЧХ. Поскольку сдвинутый по фазе фильтр имеет большое затухание на высокой частоте, реактивная мощность предназначена главным образом для расчета на частоте основной гармоники. Влияние высших гармоник в значительной степени игнорируется при расчете реактивной мощности.

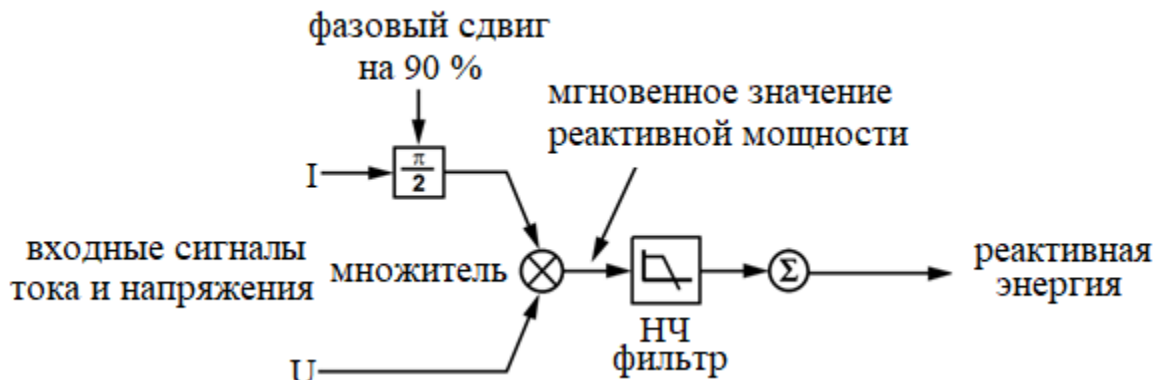


Рисунок 3.2 – Функциональная схема измерения реактивной энергии

Кроме этого, для различных приборов, в том числе для многофункциональных измерителей показателей качества электроэнергии, измерение реактивной мощности может осуществляться путём аналогового или цифрового перемножения напряжения и тока. При этом напряжение (или ток) путём применения интегрирующей цепи или смещения времени на четверть периода предварительно сдвигается на  $90^\circ$ , далее используется фильтр или иная цифровая обработка сигнала [46].

Имеющиеся разнообразные решения по сдвигу фазы напряжения или тока

разработаны для синусоидальных напряжений и токов, поэтому они работают правильно для частоты основной гармоники, а при наличии других гармонических составляющих они могут привести совсем к другим результатам [12; 46].

Например, при наличии гармоник, если производится сдвиг времени на четверть периода для тока, математическое выражение реактивной мощности имеет вид (3.9)

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i \left( t + \frac{T}{4} \right) dt = Q_1 - P_2 - Q_3 + P_4 + \dots, \quad (3.9)$$

где  $u(t)$ ,  $i(t)$  – мгновенные значения напряжения и тока;

$T$  – период первой гармоники.

С другой стороны, если с помощью интегрирующей схемы выполняется сдвиг напряжения на  $90^\circ$  математическое выражение реактивной мощности будет иметь другой вид (3.10)

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \omega \left( - \int u(t) i(t) dt \right) = Q_1 + \frac{Q_2}{2} + Q_3. \quad (3.10)$$

Численные значения реактивной мощности (или энергии), получаемые из уравнений (3.9) и (3.10) для одних и тех же рабочих условий, различны.

Анализ технических характеристик высокоточных интегральных схем, например, производства фирмы Analog.com, показывает, что вычисление реактивной энергии возможно по различным формулам. Для многофункциональных измерителей показателей качества электроэнергии спектр алгоритмов расчета реактивной мощности может быть достаточно широким. Счетчики электроэнергии могут вычислять полную реактивную мощность, которая включает компоненты тока и напряжения на основной частоте и на высших гармониках (3.11)

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U^{(h)} I^{(h)} \sin(\varphi^{(h)} - \gamma^{(h)}), \quad (3.11)$$

где  $U^h$ ,  $I^h$  – среднеквадратичные напряжение и ток каждой гармоники;

$\varphi^h$ ,  $\gamma^h$  – начальные фазы на гармониках у напряжения и тока.

В счётчиках, работающих по принципу преобразования сигналов

напряжения и тока, также может использоваться математическое определение реактивной мощности (или энергии) (3.12)

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} . \quad (3.12)$$

При этом реактивная мощность вычисляется на основе измерения активной и полной мощностей.

При синусоидальном напряжении и токе все эти выражения дают одинаковые значения [90]. Поэтому в соответствии со стандартом на реактивные счетчики электроэнергии для этих условий могут применяться все указанные методы расчета реактивной мощности.

При наличии высших гармоник в напряжении и токе эти методы расчета могут приводить к разным результатам. Как показано в следующем разделе диссертации, разница в показаниях между электронными счетчиками при наличии в сети высших гармоник может достигать порядка 30%. Поэтому необходимо определить, какие характеристики электрической сети позволят более точно вести учёт потребления реактивной мощности при наличии искажений.

### **3.4 Лабораторные исследования влияния высших гармоник на учет потребления электроэнергии**

С целью уточнения величины вносимой погрешности измерений при наличии высших гармоник в работе проведены экспериментальные исследования влияния высших гармоник на измерение и учет потребления электрической энергии.

Тестировалось три электронных счетчика электрической энергии и сравнивались их показания с анализатором качества электрической энергии «Ресурс UF2M». Два счетчика зарубежного производства и один отечественный счетчик, класс точности по активной мощности 1.0, по реактивной – 2.0.

Упрощенная электрическая схема экспериментального стенда для измерений представлена на рисунке 3.3.

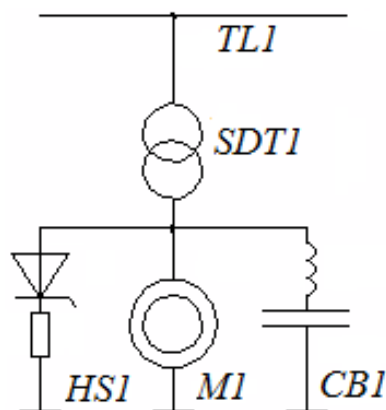


Рисунок 3.3 – Однолинейная принципиальная схема стенда

Стенд запитан от сети через линию TL1 фазным напряжением 220 В. Установка включает трехфазный лабораторный автотрансформатор STD1, асинхронный двигатель с нагрузкой в виде генератора постоянного тока M1, конденсаторную батарею с антигармоническим реактором CB1, неуправляемый трехфазный выпрямитель с нагрузкой в виде активного сопротивления HS1. Задавались различные режимы работы сети и снимались показания с тестируемых счетчиков электроэнергии. Фиксировались показания активной, реактивной и полной мощностей.

Внешний вид экспериментального стенда для измерений представлен на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Внешний вид экспериментального стенда

Режиму 1 соответствует подключенный электродвигатель номинальной мощностью 1.5 кВт на холостом ходу и неуправляемый трехфазный выпрямитель с нагрузкой в виде активного сопротивления потребляемой мощностью около 1.0 кВт. Режиму 2 соответствует режим 1 с дополнительно подключенной конденсаторной батареей (коэффициент мощности около 0.94, индуктивный режим). Режиму 3 соответствует режим 2 с перекомпенсацией реактивной мощности (коэффициент мощности около 0.92, емкостный режим). Режимы 4, 5, 6 – режимы 1, 2, 3 с подключенной нагрузкой на валу асинхронного двигателя соответственно. Для режимов 5 и 6 коэффициенты мощности составляют около 0.94 и 0.88 соответственно.

Измеренные и расчетные значения для различных режимов работы нагрузки представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Потребляемая активная, реактивная и полная мощности

Режимы	Счетчик 1			Счетчик 2			Счетчик 3			Анализатор	
	Q	P	S	Q	P	S	Q	P	S	Q	P
	<i>вар</i>	<i>Вт</i>	<i>ВА</i>	<i>вар</i>	<i>Вт</i>	<i>ВА</i>	<i>вар</i>	<i>Вт</i>	<i>ВА</i>	<i>вар</i>	<i>Вт</i>
1	28	554	738	33	569	752	29	583	754	29	550
2	72	83	18	71	60	22	71	63	21	73	40
3	85	-285	54	87	322	57	84	-315	50	87	-340
4	408	293	913	404	-332	925	407	326	923	409	330
5	420	80	505	420	22	506	420	23	510	421	00
6	442	-776	640	441	-780	644	442	-779	632	444	-790

При экспериментальных исследованиях процентная погрешность измеряемой величины вычислялась относительно значений, измеренных анализатором качества электрической энергии. Дополнительно для оценки измерительного уравнения проводились расчеты значений реактивной мощности по ранее приведенным формулам.

В результате проведенных экспериментальных исследований, при которых для различных режимов работы фиксировались показания потребляемой мощности счетчиками электрической энергии, получены относительные погрешности по активной и реактивной мощности. При этом для всех режимов

суммарный коэффициент искажения мощности по напряжению  $THD_U$  составлял около 2%, а по току  $THD_I$  менялся в пределах от 15 до 30%. Как показали исследования, электронные счетчики корректно обрабатывают математическую модель по активной мощности в соответствии со своим классом точности. Погрешности по реактивной мощности представлены на рисунке 3.5.

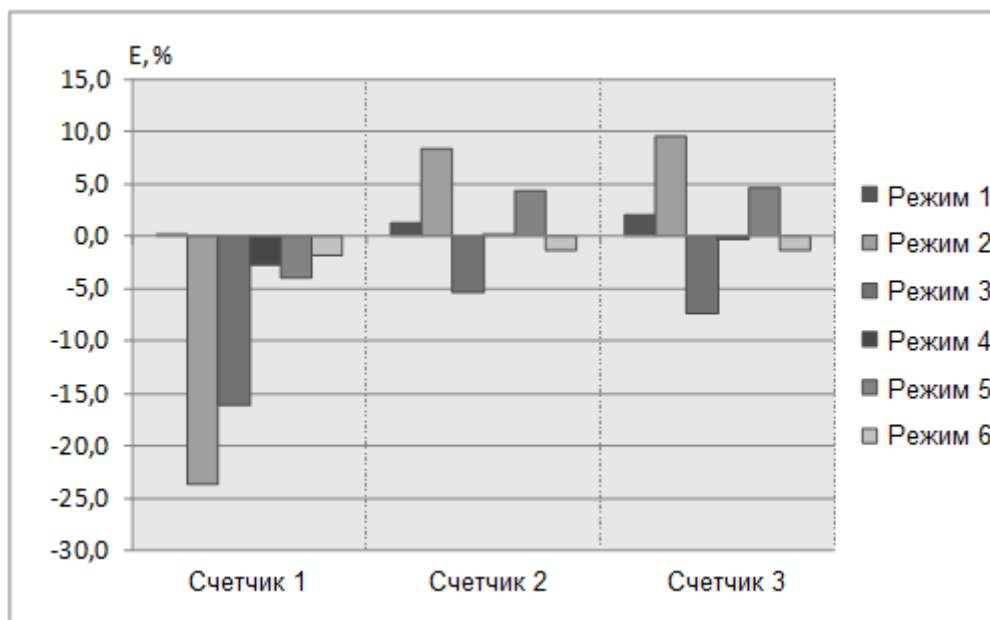


Рисунок 3.5 – Относительные погрешности при определении реактивной мощности

Из полученных результатов видно, что относительная погрешность измерения реактивной мощности при включении конденсаторных батарей значительно возрастает, что связано с увеличением  $THD_I$ . Для счетчика 1 погрешность достигает 24 % в сторону недоучета, а для счетчиков 2 и 3 не превышает 10 % в сторону переучета. Включение конденсаторных батарей без антигармонического реактора будет приводить к еще большим погрешностям. Также наблюдается закономерность увеличения относительной погрешности измерения реактивной мощности с увеличением коэффициента мощности сети.

Анализ соответствия измеряемых значений математическим моделям счетчиков электроэнергии показал, что счетчики 2 и 3 вычисляют значение реактивной мощности по геометрическому методу. Счетчик 1 при сравнении с показаниями по геометрическому методу дает максимальную погрешность 32 %, а при сравнении с показаниями по выражению (3.8) выдает погрешность, не

превышающую 5 %, следовательно, вероятнее всего вычисления проводятся по выражению (3.8). Этим объясняются значительные погрешности счетчика электроэнергии 1 по сравнению с показаниями анализатора качества электроэнергии, который вычисляет реактивную мощность по выражению (3.12).

Полученные результаты приводят к нескольким выводам. Известно, что при генерировании высших гармоник собственной нелинейной электрической нагрузкой активные мощности высших гармоник имеют отрицательное значение, и, наоборот, при возникновении высших гармоник со стороны электрической сети относительно ТОП активные мощности высших гармоник суммируются с активной мощностью основной гармоники. Таким образом, потребитель, который не искажает напряжение питающей сети, платит больше за активную мощность, а потребитель, вносящий искажения в сеть, платит меньше. Это относится к активной мощности.

Как указано ранее, измерение реактивной мощности в результате проведенных исследований возможно по различным математическим уравнениям. При расчетах по выражению (3.12) реактивная мощность определяется на основании измерения активной мощности. Следовательно, потребитель, вносящий искажения в сеть будет производить большую оплату за реактивную электроэнергию. При расчетах по выражению (3.11) вычисляется значение реактивной мощности, соответствующее значению на основной гармонике. При этом в случае генерации высших гармоник со стороны потребителя, значение реактивной мощности оказывается заниженным в сравнении с выражением (3.14), о чем свидетельствуют проведенные испытания. Также значения реактивной мощности могут оказаться завышенными при возникновении гармоник со стороны сети.

Таким образом, выявлены математические модели расчета активной и реактивной мощностей, применяемые в электронных счетчиках электроэнергии при наличии искажений. Показано, что при наличии высших гармоник в напряжении и токе показания счетчиков могут существенно отличаться между

собой, а также от значений измеряемой энергии (мощности) на основной гармонике.

Модель расчета активной мощности при наличии высших гармоник совпадает для всех счетчиков электроэнергии, однако является сомнительной с точки зрения справедливости расчетов для потребителей, вносящих искажения в сеть, и потребителей с линейной электрической нагрузкой. По реактивной мощности в результате различий вычислительных выражений счетчиков различных производителей возможна ситуация, когда для крупных промышленных потребителей с мощной нелинейной электрической нагрузкой фиксируемые показания оказываются заниженными при одинаковых режимах электропотребления, а для потребителей, не вносящих искажения в сеть, фиксируемые показания могут быть завышенными.

Выводы: измерение реактивной мощности существующими приборами учета в результате проведенных исследований возможно по различным математическим уравнениям. При расчетах по геометрическому методу реактивная мощность определяется на основании измерения активной и полной мощности. Следовательно, потребитель, вносящий искажения в сеть будет производить большую оплату за реактивную электроэнергию.

При расчетах по второму методу вычисляется значение реактивной мощности, соответствующее значению на основной гармонике. В этом случае реактивную мощность называют мощностью сдвига, которая характеризует состав электрической нагрузки и сдвиг фаз между напряжением и током на основной гармонике. Этот метод представляется наиболее целесообразным для расчета оплаты за реактивную энергию при существующих нормативных документах в области поддержания соотношений потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии.

### 3.5 Учет электроэнергии при изменении параметров сети, связанных с влиянием высших гармоник

Исследование проведено по схемам, характерным для следующих предприятий (рисунки 3.6 и 3.7):

- производство алюминия;
- нефтегазовое и горнодобывающее производство.

В спектре сигнала с проявляющимися 5,7,11,13 и 17 гармониками тока, где с увеличением номера гармоники наблюдается уменьшение величины амплитуды гармоники.

По оси абсцисс откладываются значения процентного соотношения вклада линейной нагрузки относительно нелинейной (0% - нелинейная нагрузка отсутствует, в цепи только линейная нагрузка; 100% - полностью нелинейная нагрузка). По оси ординат значения искоемых видов мощности.

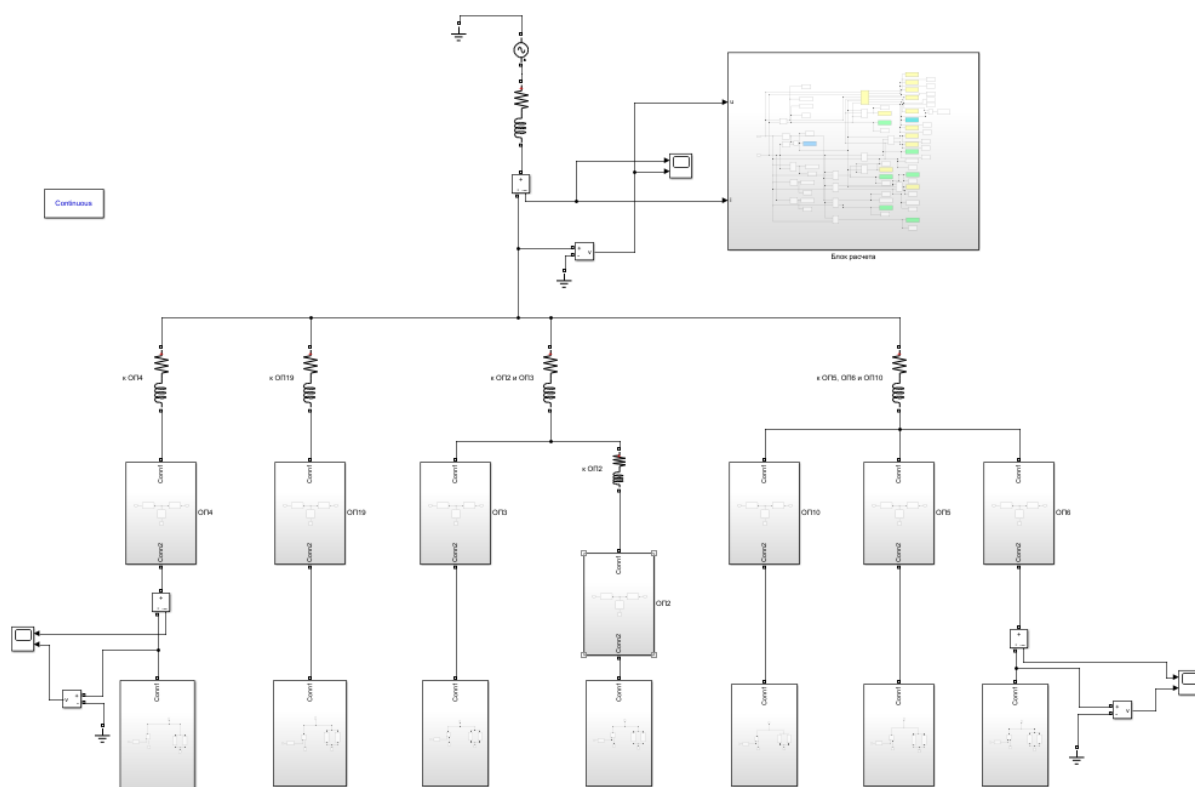


Рисунок 3.6 – Модель схемы предприятия алюминиевой промышленности радиального типа с блоком расчета мощностей



Для примера работу модели по схеме предприятия радиального типа алюминиевой промышленности, имеющую в своем составе нелинейную нагрузку (рисунок 3.8). Тогда характеры изменения полной, реактивной и неактивной мощностей имеют вид, представленный на рисунке 3.9.

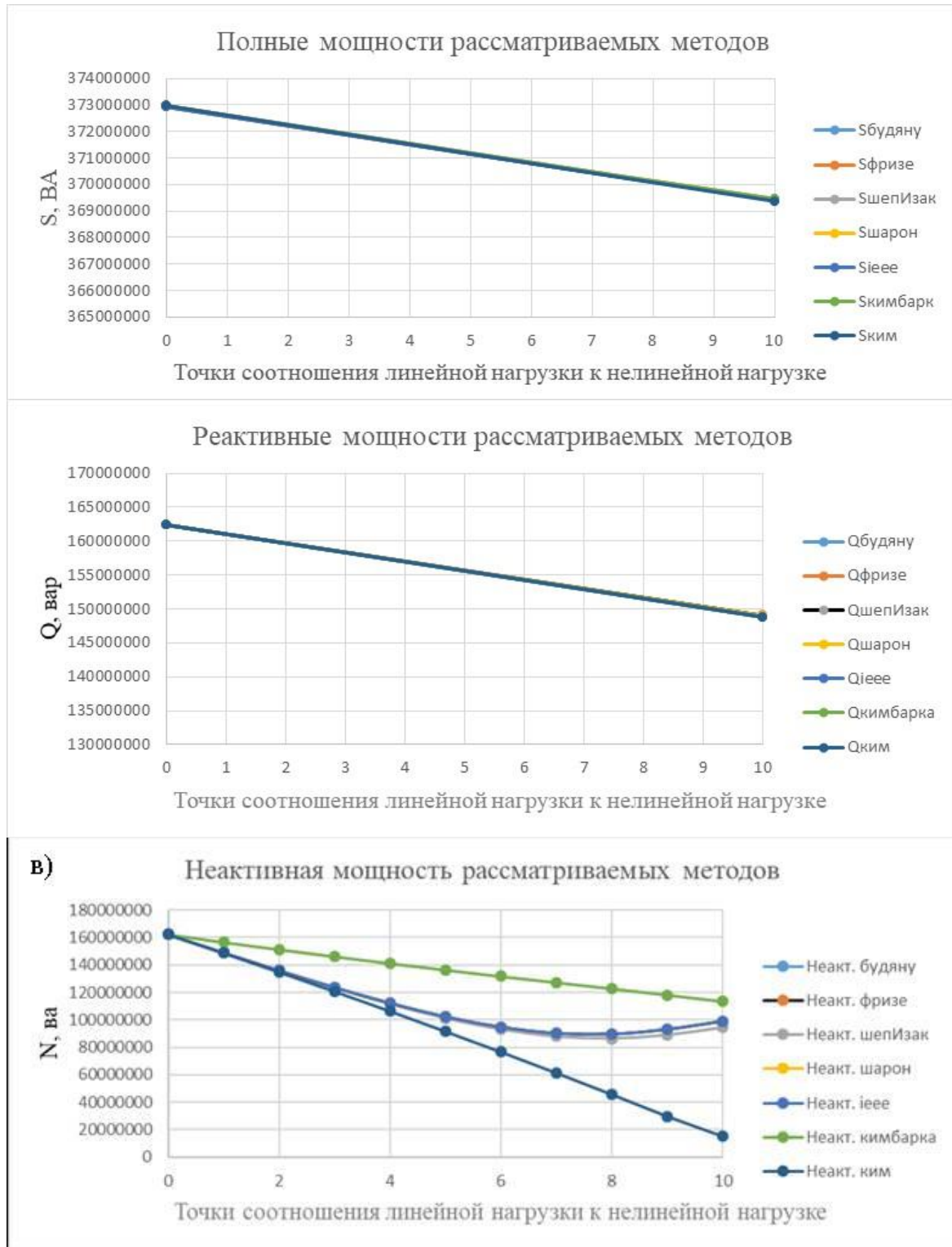


Рисунок 3.9 – Мощности рассматриваемых теорий а) полная, б) реактивная, в) неактивная

В результате моделирования выявлены соответствия и расхождения в значениях между следующими видами мощностей (таблица 3.4 и рисунок 3.10), где « $\Rightarrow$ » означает равенство значений; «+»/«-» - значения в данном методе выше или ниже остальных соответственно.

Таблица 3.4 – Численные значения мощностей

Теория/ Виды мощностей	C.I. Budeanu	S. Fryze	W. She pherd & P. Zakikhani	L.Kust ers & W.J.W. Moore	ND. Sharon	E. Kimbark	IEEE 1459-2010
Полная	=	=	=	-	=	=	=
Активная	=	=	=	=	=	=	=
Неактивная	=	=	=	-	=	+	=
Реактивная	=	+	+	=	+	=	=

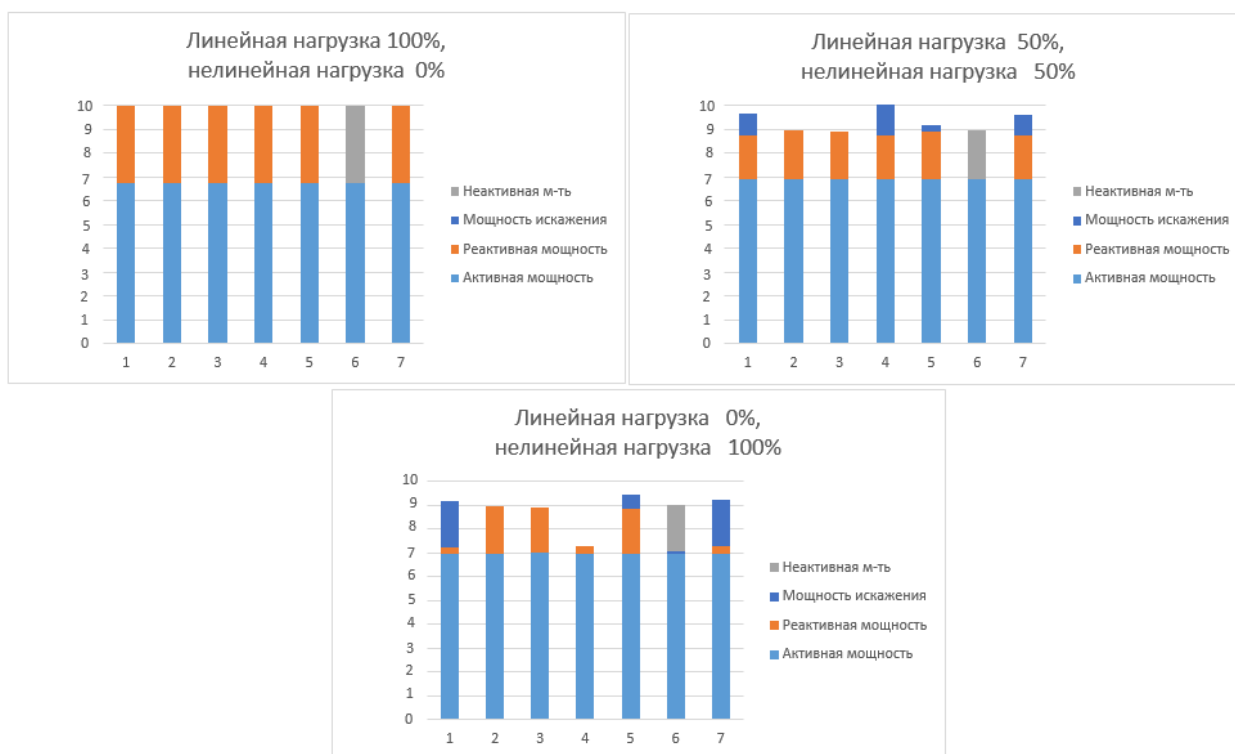


Рисунок 3.10 – Вклад отдельных компонентов мощности по разным теориям мощности

На рисунках 3.11- 3.13 представлены графики при различных подходах к учету электроэнергии, но при одинаковом спектре.

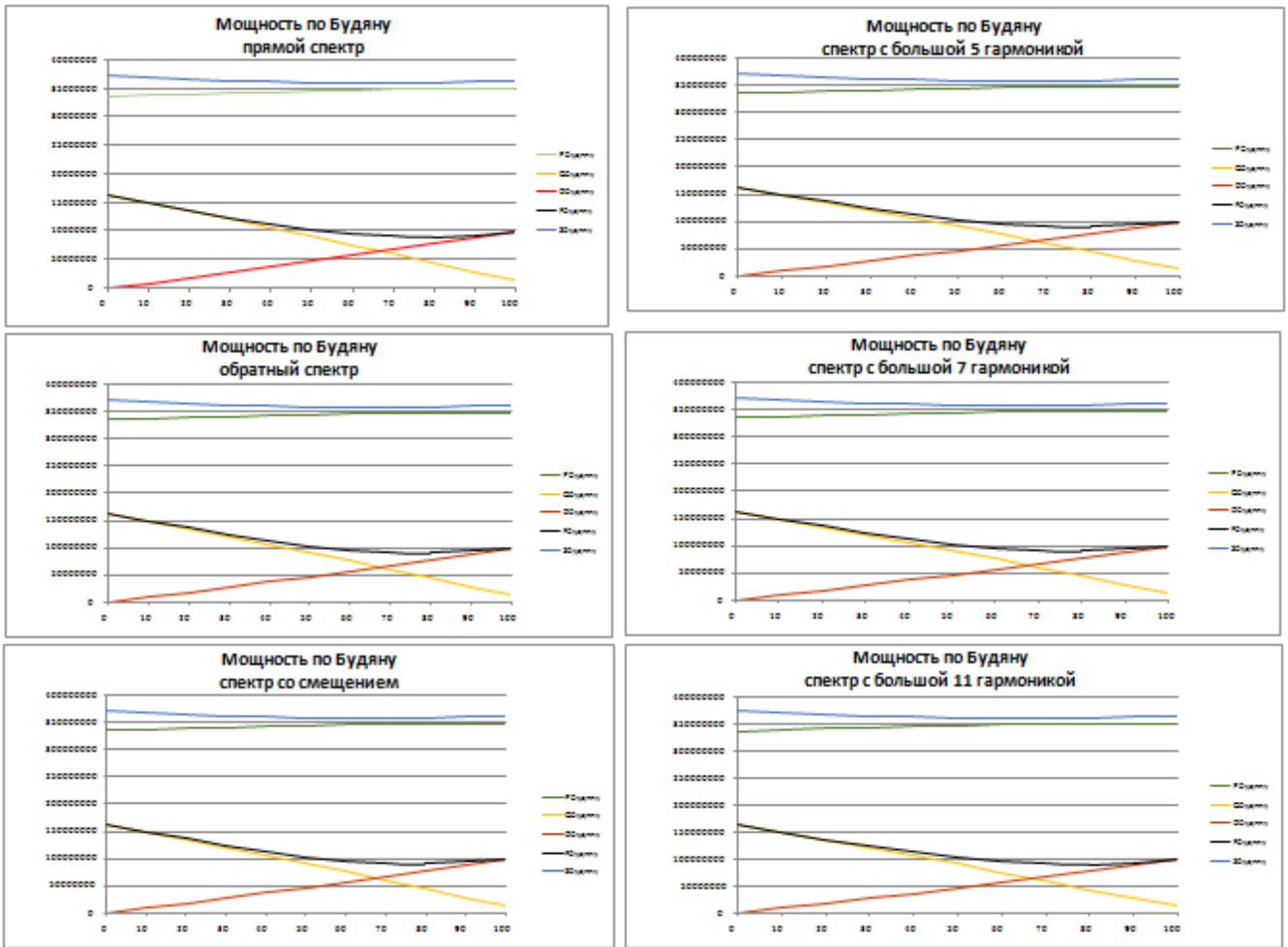


Рисунок 3.11 – Результаты моделирования при одном подходе в разных спектрах

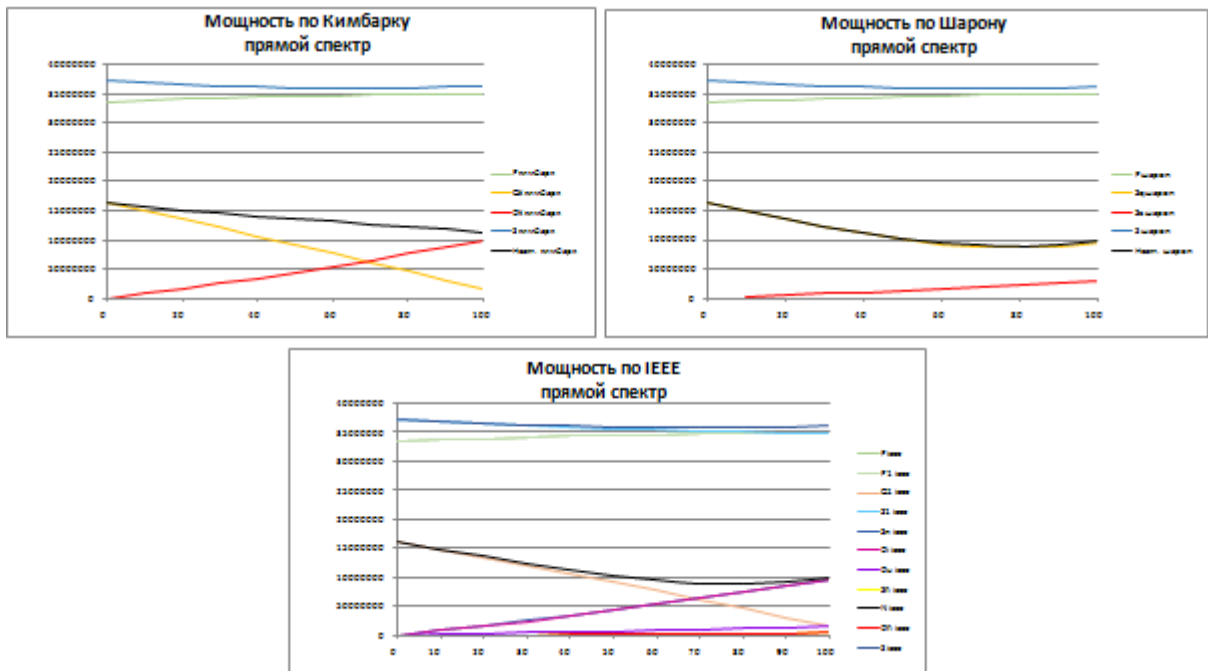


Рисунок 3.12 – Результаты моделирования при разных подходах к ТМ

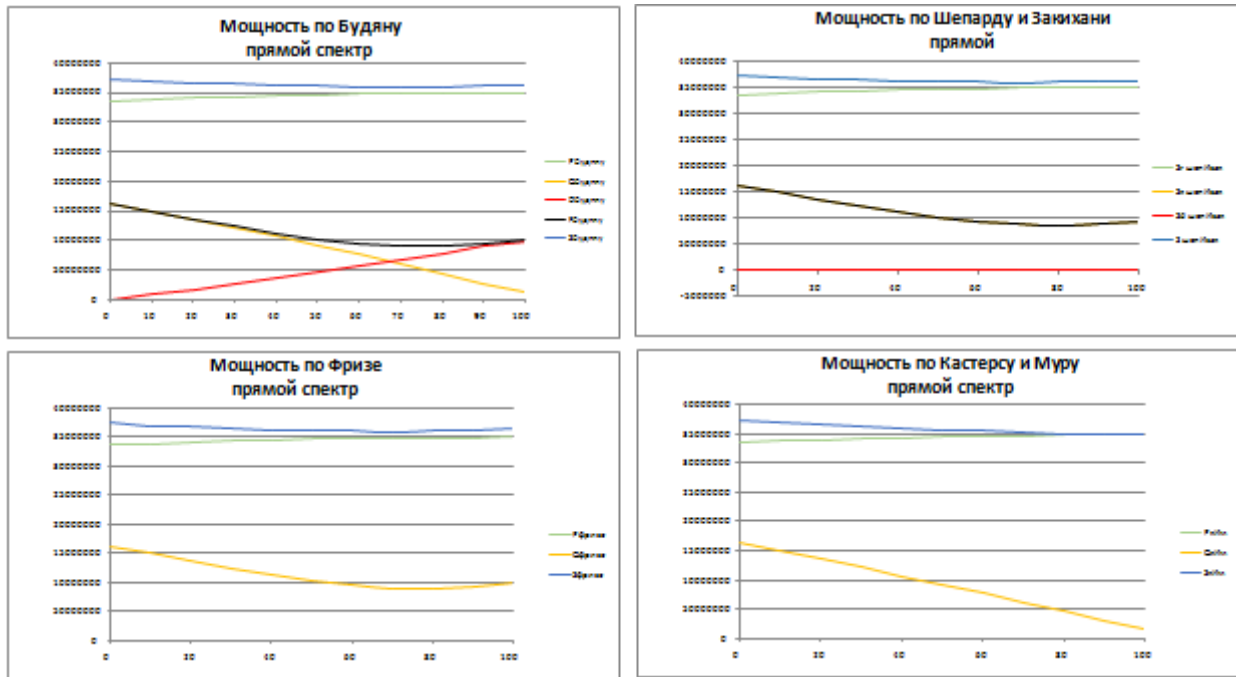


Рисунок 3.13 – Результаты моделирования при разных подходах к учету электроэнергии при одинаковом спектре

Очевидно, что  $N=Q$  только в случае чисто синусоидального сигнала.

Таким образом, вести учет реактивной мощности при наличии искажений по формулам, заложенным в счетчики, необходимо с учетом ранее выявленных зависимостей  $THD_U$  от  $k_Z^{(h)}$  и модуля полного сопротивления системы:

1) при  $k_Z^{(h)}$  больше 5 и модуле полного сопротивления до 0,5 можно применять счетчики, где заложена формула (3.12), поскольку  $THD_U$  при таком соотношении минимален и не превышает ограниченного стандартом значения в 5%;

2) при  $k_Z^{(h)}$  меньше 5 и модуле полного сопротивления до 0,5 следует применять счетчики, где заложена формула (3.11), поскольку  $THD_U$  превышает значения, ограниченные стандартом и учет необходимо вести с вкладом гармоник. При этом чем меньше соотношение в показателе  $k_Z^{(h)}$ , тем строже рекомендация по применению счетчиков с указанной формулой расчета РМ.

Таким образом, выявлено, что при классическом подходе разложения полной мощности на активную и реактивную происходит переплата за потребление реактивной энергии, поскольку в неё входит, как минимум, «мощность

искажений». Первый шаг по совершенствованию учета потребления реактивной мощности на данном этапе это принимать во внимание выявленные зависимости суммарного коэффициента несинусоидальности  $THD_U$  от модуля полного сопротивления системы и показателя  $k_Z^{(h)}$ , отражающего соотношение его активной и реактивной составляющих.

### 3.6 Выводы по Главе 3

Полученные данные являются основанием для вывода, что при выборе формул расчета, используемых для счетчиков, необходимо руководствоваться режимом сети и его характеристиками: необходимо, как минимум, учитывать разложение неактивной мощности на реактивную и мощность искажения, поскольку иначе искусственно завышается значение реактивной мощности. Следующая задача изучить влияние состава нагрузки на уровень несинусоидальности в сети.

Из вышесказанного следует, что вести учет реактивной мощности при наличии искажений по формулам, заложенным в счетчики, необходимо с учетом ранее выявленных зависимостей  $THD_U$  от  $k_Z^{(h)}$  и модуля полного сопротивления системы:

1) при модуле полного сопротивления до 0,5 и  $k_Z^{(h)}$  больше 5 можно применять счетчики, где заложена формула (3.12), поскольку  $THD_U$  при таком соотношении минимален и не превышает ограниченного стандартом значения в 5%; при значении  $k_Z^{(h)}$  меньше 5 учет следует вести по формуле (3.11). При этом чем меньше соотношение в показателе  $k_Z^{(h)}$ , тем строже рекомендация по применению счетчиков с указанной формулой расчета РМ;

2) при модуле полного сопротивления от 0,5 до 2 происходит выравнивание значения  $THD_U$  к минимальному значению при  $k_Z^{(h)}$  больше 5, но тем не менее применять формулу (3.12) уже нельзя, поскольку  $THD_U$  в разы превышает нормированный уровень в 5%. В этом случае целесообразным становится применение лишь формулы (3.11), учитывающей вклад гармоник.

Таким образом, выявлено, что при классическом подходе разложения полной мощности на активную и реактивную происходит переплата за потребление реактивной энергии, поскольку в неё входит, как минимум, «мощность искажений». В качестве первого шага по совершенствованию учета потребления реактивной мощности на данном этапе предлагается применение выявленных зависимостей  $THD_U$  от модуля полного сопротивления системы  $Z_S$  и показателя  $k_Z^{(h)}$ , отражающего соотношение его активной и реактивной составляющих.

Недостаток рассмотренных подходов к учету электроэнергии заключается в затруднении применения данных подходов в качестве основы для работы современных фильтрокомпенсирующих устройств. Поскольку в исследуемых системах требуется низкая инерционность и минимальное запаздывание в измерении активной мгновенной мощности, то следующим этапом исследования является задача быстрого определения спектрального состава высших гармоник.

## ГЛАВА 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЕ СЕТИ

Совершенствование учета потребления электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий при наличии искажений возможно только при комплексном подходе и прежде всего связан с оплатой отдельно по активной и реактивной «энергии» [28; 56]. При определении суммарного коэффициента искажения по напряжению необходимо учитывать модуль полного сопротивления системы, соотношение его составляющих (активной и реактивной) и закладывать математический аппарат расчёта мощности под соответствующие характеристики сети [35; 36].

Предварительные исследования показали, что для учета электроэнергии при наличии высших необходимо выявить взаимное влияние состава нагрузок в электротехнических комплексах предприятий (линейного и нелинейного компонентов нагрузки). Также установлено, что уменьшение запаздывания работы системы управления фильтрокомпенсирующими устройствами влияет на уменьшение потребления реактивной «энергии».

### 4.1 Затраты на электроэнергию

Данный раздел посвящён выбору критерия оплаты за потребляемую электроэнергию, которая подразделяется на две части: оплата за активную и реактивную мощности.

Среди «измерительных» уравнений, применяемых в счетчиках реактивной «энергии» наибольшее распространение получили следующие (4.1) и (4.2):

$$Q^{(1)} = U^{(1)} I^{(1)} \sin \varphi^{(1)}, \quad (4.1)$$

где  $U^l$ ,  $I^l$ ,  $\varphi^l$  – напряжение, ток и разность фаз между ними (аргумент полного сопротивления) на первой гармонике соответственно;

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (4.2)$$

где  $S$  – полная мощность, ВА;  $P$  – активная мощность, Вт.

Несмотря на возможность расчета реактивной по данным формулам, с учетом влияния модуля полного сопротивления и отношения его активной и реактивной составляющей, данный подход не позволяет говорить о высокой некорректности учета реактивной энергии.

Из вышесказанного следует, что до сих пор не решены две задачи:

1. Не определены показатели, отражающие численно влияние искажений на режимы распределительных электрических сетей.
2. Не определены показатели, учитывающие потребляемую неактивную мощность (по аналогии с реактивной в синусоидальном режиме) при расчете за электроэнергию с поставщиком электроэнергии.

Решение первой задачи. Как показали проведенные исследования, значение коэффициента мощности равное единице не является единственным и достаточным условием оптимальности режима передачи электроэнергии. Объясняется это увеличением потерь активной мощности [17] с ростом порядка гармоник, которые определяются формулой (4.3)

$$P = I^2 R = I_1^2 (1 + THD_i^2) R. \quad (4.3)$$

Для подтверждения этого тезиса на рисунке 4.1 представлены результаты исследования влияния искажений по току на потери активной мощности для конкретных исходных данных.

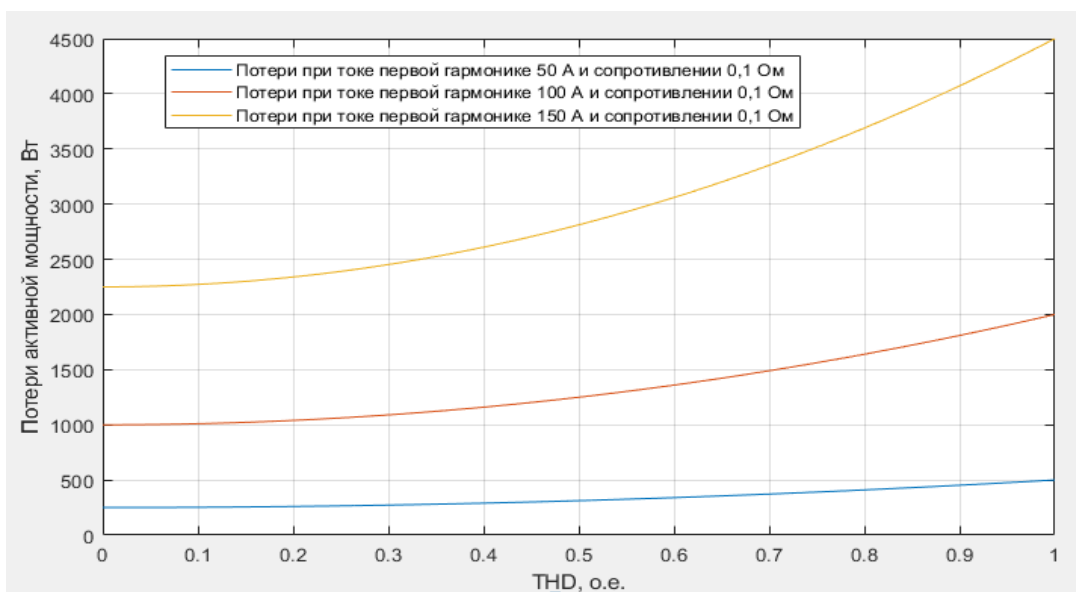


Рисунок 4.1 – Графики потери активной мощности при наличии искажений

Следует подчеркнуть, что полученная зависимость носит обобщенный характер для любых параметров режима работы сети.

Действующее значение полного тока можно выразить через гармонический ряд следующим образом (4.4)

$$I^2 = \sum_{h=1}^n I_a^{(h)2} + \sum_{h=1}^n I_p^{(h)2} = I_a^{(1)2} + \sum_{h=2}^n I_a^{(h)2} + \sum_{h=1}^n I_p^{(h)2}, \quad (4.4)$$

где  $I_a^{(1)}$  – активный ток первой гармоники;  $I_a^{(h)}, I_p^{(h)}$  – активный и реактивный токи на  $h$ -гармонике.

Следовательно, значение коэффициента мощности равное 1 можно получить при условиях, определяемых выражениями (4.5) или (4.6):

$$\sum_{h=1}^n I_p^{(h)2} = 0, \quad (4.5)$$

$$\sum_{h=2}^n I_a^{(h)2} = 0 \text{ и } \sum_{h=1}^n I_p^{(h)2} = 0 \quad (4.6)$$

Исходя из реальной ситуации по компенсации реактивной мощности, условие (4.5) возможно лишь в случае применения достаточно сложной конфигурации активного фильтра. В других случаях выполнение этого условия невозможно.

Аналогичная ситуация с условием (4.6). При этом следует отметить, что фильтрация высших гармоник реальна и в завершающей части диссертации описывается метод с применением быстрого преобразования Фурье [24], который позволяет снизить инерционность измерения спектрального состава токов и напряжений в сети.

Отсюда следует условие, которое можно представить следующим образом (4.7)

$$\sum_{h=2}^n I_a^{(h)2} = 0 \text{ и } \sum_{h=1}^n I_p^{(h)2} \rightarrow \min \quad (4.7)$$

Решая вторую задачу, прежде всего необходимо ответить на следующие вопросы:

- каким образом на потребление активной и реактивной мощности влияет наличие высших гармоник, обусловленных либо внешней сетью либо внутренней нагрузкой предприятия?
- почему и зачем энергоснабжающие организации заинтересованы в оплате за реактивную мощность?

#### 4.2 Влияние нелинейной нагрузки на уровень несинусоидальности на линейной

Для определения влияния несинусоидального напряжения, на гармонический состав тока нагрузки, содержащей только линейную составляющую, обусловленного внешними факторами, разработана в среде MatLab Simulink компьютерная модель электротехнического комплекса, представленная на рисунке 4.2.

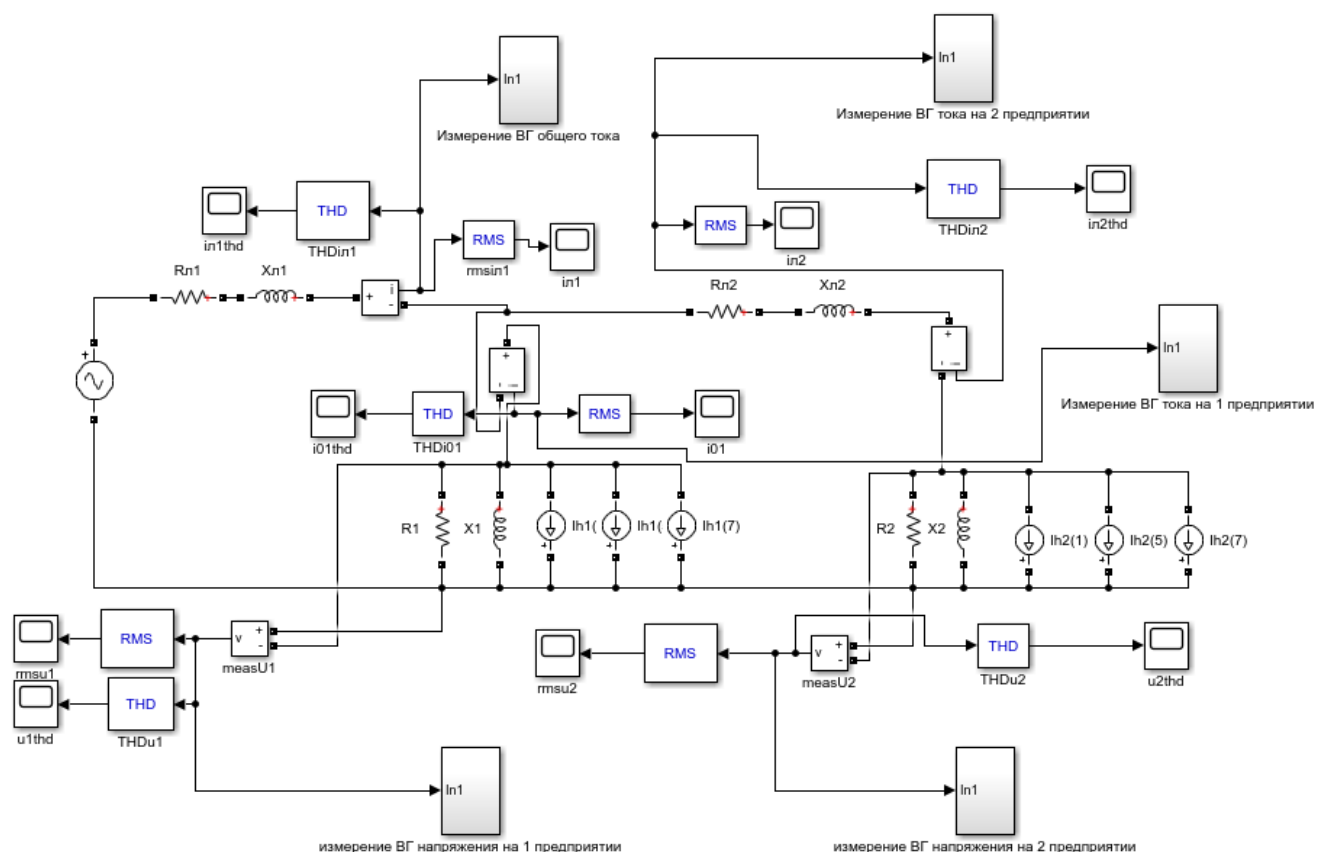


Рисунок 4.2 – Модель схемы в среде MatLab Simulink для исследования влияния соотношения НН и ЛН

Условия эксперимента:

- 1) нагрузка в фазах симметричная, поэтому трёхфазная система приводится к виду однофазной;
- 2) номинальное напряжение источника 6 кВ, поскольку моделирование проводится для сетей среднего напряжения 6-10 кВ;
- 3) от общей линии запитана нагрузка двух предприятий в составе которых заложена возможность регулирования отношения линейной нагрузки к нелинейной;
- 4) дополнительно анализируется состав токов;
- 5) расчет суммарного коэффициента искажения по напряжению ведется по двум формулам с целью проверки возможности расчета  $THDu$  и по номинальному напряжению  $U_{ном}$ . Один блок рассчитывает классическим способом деления на напряжение первой гармоники (1.29), другой блок ведет расчет по формуле (4.8)

$$THDu = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^H U^{(h)2}}{U_{ном}^2}}, \quad (4.8)$$

где  $H$  – номер последней учитываемой гармоники.

Влияние внешних факторов рассматривается по отношению к линейной нагрузке, поскольку в этом случае исключена её роль, как источника искажения. В таком случае, внешнее воздействие будет оказывать нелинейная нагрузка другого предприятия, подключенного к питающей сети первого предприятия. Таким образом, возникновение несинусоидальности напряжения сети однозначно указывает на предприятие с нелинейной нагрузкой, как на источник искажения.

Исходя из максимально возможного худшего результата относительно уровня высших гармоник ( $THDu \rightarrow \max$ ), приняты следующие допущения:

- линейная нагрузка, имея активно-индуктивный характер, представляется чисто активным сопротивлением, так как индуктивная составляющая в таком случае будет играть роль фильтра и окажет подавляющее воздействие на высших гармоники, поступающие со стороны сети;

- поскольку наибольшее значение суммарного коэффициента искажения по напряжению  $THDu$  будет иметь место при чисто индуктивном характере, то сопротивление линии принято чисто индуктивным;
- нагрузка, являющаяся источником высших гармоник, представляется без линейной части;
- поскольку конденсаторы поперечной компенсации будут понижать значение  $THDu$ , то сеть принята некомпенсированной.

Параметры схемы замещения на соответствующей компьютерной модели (рисунок 4.2), представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры схемы замещения для определения влияния НН на ЛН

Параметр	Значение
Индуктивное сопротивление питающей линии $X_{л0}$ , Ом	0,1; 0,3; 0,5
Активное сопротивление линейной нагрузки $R_{n2}$ , Ом	0-30 с шагом 5 Ом
Ток на нелинейной нагрузке $I_1$ , А	500; 1000; 2500; 5000

На рисунке 4.3 представлены графики изменения  $THDu$  в зависимости от сопротивления  $R_{n2}$  на линейной нагрузке при различной величине тока нелинейной нагрузки  $I_1$ .

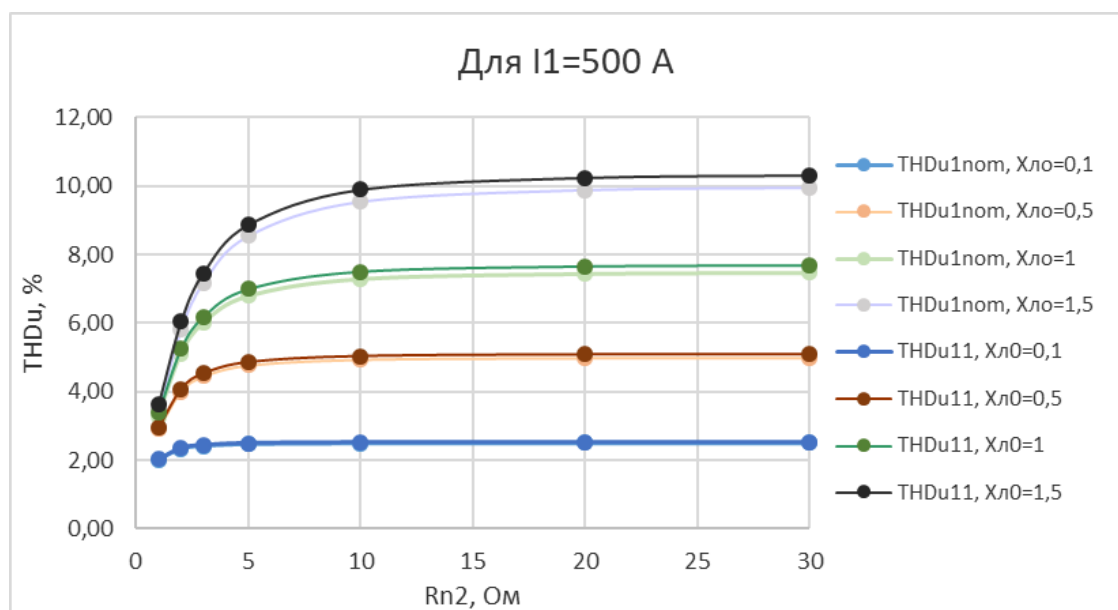
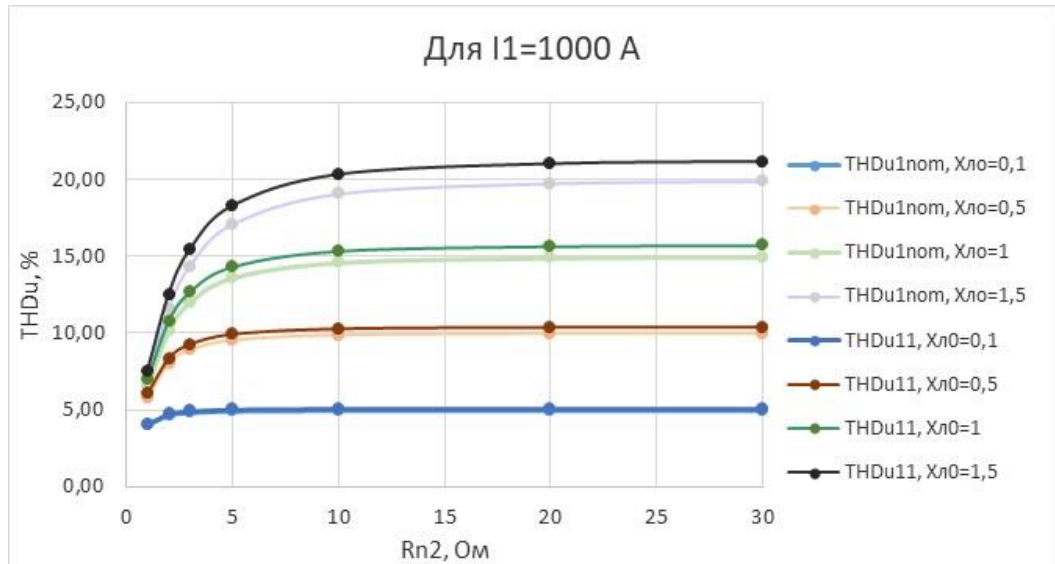
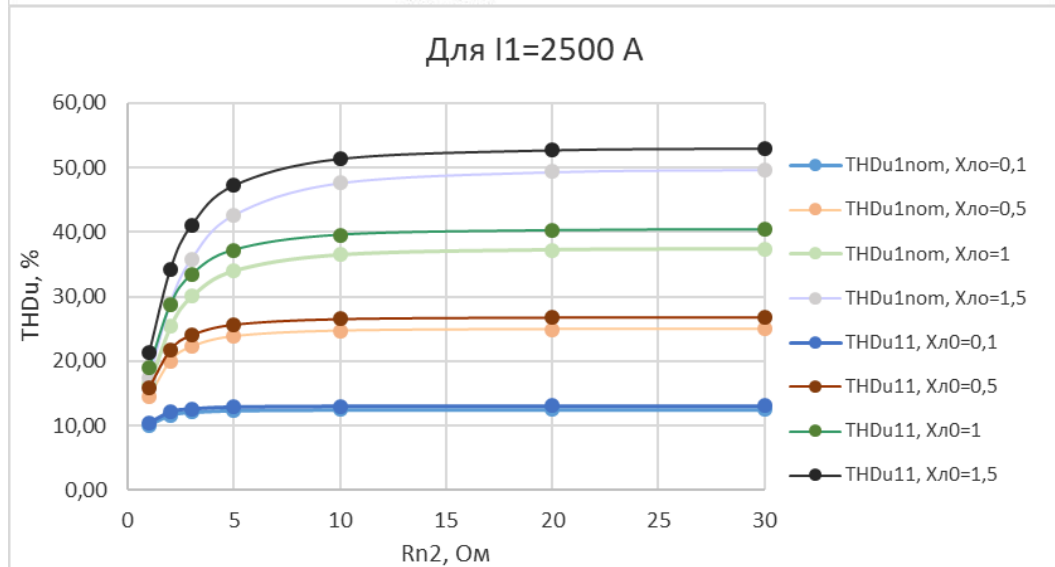


Рисунок 4.3 (а) – Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от линейной нагрузки при токе НН нагрузки а) 500 А

б)



в)



г)

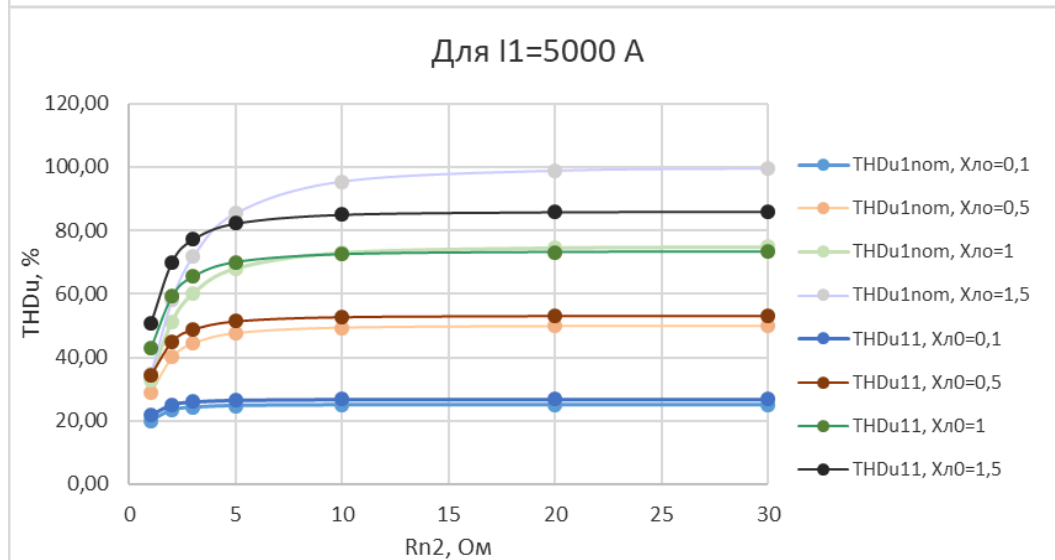


Рисунок 4.3(б, в, г) – Зависимость суммарного коэффициента искажения по напряжению от линейной нагрузки при токе НН нагрузки б) 1000А, в) 2500 А, г) 5000 А

Область ограничения значений  $THDu$  определялась из условия  $\Delta U_0 < 0,15 U_{НОМ}$ , что обозначено кривой под цифрой 1.

Анализ полученных графиков  $THDu$  в функции от токов линейной и нелинейной нагрузки позволяет сделать следующие выводы:

✓ при наличии на предприятии чисто линейной нагрузки, поступающие из внешней сети высшие гармоники не влияют на общее значение суммарного коэффициента искажения по напряжению, что позволяет при его определении не учитывать искажения, возникающие в линейной нагрузке;

✓ применение при расчете  $THDu$  номинального напряжения  $U_{НОМ}$  вместо  $U^{(1)}$  может привести к погрешности не превышающей 15%, что может оказаться приемлемым в некоторых случаях, определяемых потребителем.

Аналогичное исследование, результаты которого подтверждают предыдущий тезис, сделано для случая с добавлением сопротивления линии для той модели в MatLab, питающей линейную нагрузку.

Для примера приведены графики изменения  $THDu0$  (общего) и  $THDu2$  (на линейной нагрузке) при:

- 1) фиксированном сопротивлении общей линии 0,1 и изменении сопротивления на второй линии от 0,1 до 0,5 (рисунок 4.4);

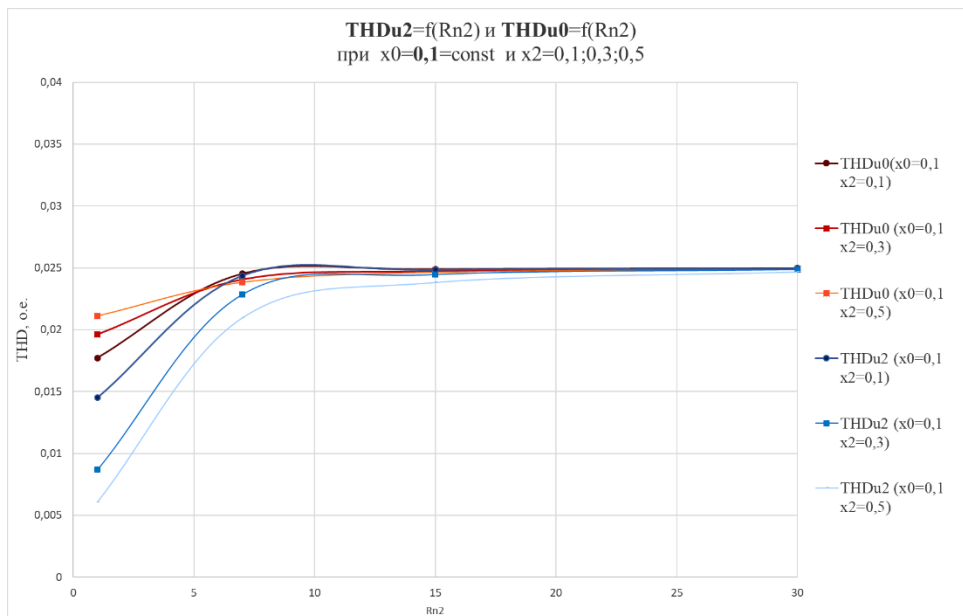


Рисунок 4.4 – Зависимость  $THDu$  от изменения сопротивления линии у линейной нагрузки

2) фиксированном сопротивлении на второй линии 0,1 и изменении общего сопротивления линии от 0,1 до 0,5 (рисунок 4.5).

Из графика, представленного на рисунке 4.4 видно, что изменение сопротивления линии при линейной нагрузке не оказывает существенного влияния на уровень несинусоидальности в общей линии. Часть графика, находящаяся в диапазоне оси абсцисс  $R_{n2}$  от 0 до 15 в анализе не участвуют, согласно введенным ограничениям.

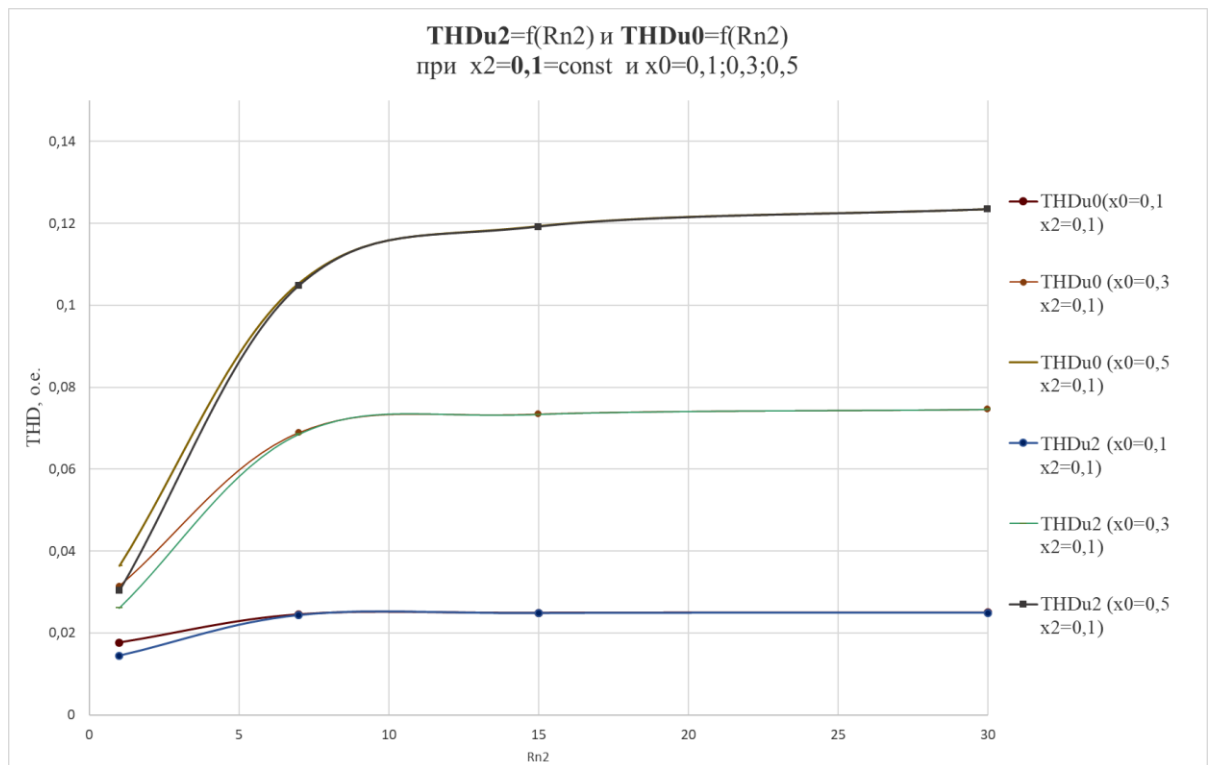


Рисунок 4.5 – Зависимость  $THDu$  от изменения сопротивления общей линии при неизменном сопротивлении линии при линейной нагрузке

Из графика, представленного на рисунке 4.5 следует, что изменение сопротивления общей линии влияет только на порядок уровня несинусоидальности – чем выше сопротивление общей линии, тем меньше величина  $THDu$ .

Анализ графиков подтверждает ранее полученные результаты.

Графики зависимости  $THDu$  от изменения соотношения сопротивлений линий при других значениях представлены в приложении В.

### 4.3 Целесообразность оплаты реактивной мощности

В научном сообществе до сих пор ведутся дискуссии по проблеме оплаты активной и реактивной мощности при наличии искажений, несмотря на устоявшийся подход к оплате по потреблению активной мощности [42; 64].

Считалось, что счетчики активной энергии объективно отражают потребление предприятиями активной мощности. Однако это не совсем так, если учесть влияние нагрузок разных предприятий, подсоединенных к общей точке подключения. Если одно из таких предприятий содержит большую долю НН, то на втором предприятии (при условии малой доли НН) от создаваемой несинусоидальности напряжения возникает несинусоидальный ток нагрузки. Этот ток создает потребление дополнительной активной мощности, что и покажет счетчик активной энергии.

Таким образом, второе предприятие переплачивает не по своей вине. Более того, первое предприятие может генерировать активную мощность на ВГ, что является достаточно распространенным режимом работы НН. Это означает, что первое предприятие будет недоплачивать за активную энергию на высших гармониках.

Однако проведенные исследования, представленные в предыдущем разделе, указывают на незначительное влияние (в отношении тока) НН на ЛН. Таким образом предлагается не вносить изменение в подход к учету активной энергии, несмотря на наличие НН на любом предприятии. В таком случае ведущие ученые предлагают вести учет по активной мощности на основной частоте, что исключает переплату за потребление активной энергии предприятиями с малой НН.

Несколько иная ситуация складывается с учетом реактивной «энергии». Понятие реактивной «энергии» введено для учета тока обмена энергией между генератором и приемником [15], который создает дополнительные потери [17] в системе электроснабжения в целом, что необходимо учитывать при оплате.

Поскольку понятие реактивной мощности неприменимо к случаю с НН, которая создает искажения, то единственным показателем уменьшения тока обмена на ВГ является уменьшение действующего значения тока  $I$  (4.9)

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_h^2} . \quad (4.9)$$

Практика оплаты за реактивную мощность во многих странах мира заключается в следующем: если предприятие превышает значение  $\operatorname{tg}\varphi = 0,4$ , то оно оплачивает реактивную «энергию» по счетчику.

В 3 главе диссертации показано, что счетчики некорректно и по-разному вычисляют потребление энергии. Исходя из вышеуказанного и учитывая результаты исследования, приведенные в предыдущем разделе, предлагается отказаться от учета реактивной «энергии», а заменить ее на интегральный показатель полного тока, учет которого может быть сформирован соответствующей математической операцией, заложенной в микропроцессор.

Предлагается на выбор два интегральных показателя (4.10) и (4.11)

$$V_1 = \int_0^t \sqrt{I^2 - I_a^{(1)2}} , \quad (4.10)$$

$$V_2 = \int_0^t I^2 - I_a^{(1)2} , \quad (4.11)$$

где  $I_a^{(1)}$  – активная составляющая полного тока на основной частоте.

Допустим  $I=100$  А,  $I_a^{(1)} = 0 \div 1$ , тогда кривые изменения  $V_1$  и  $V_2$ , представленные на рисунке 4.6, определяют затраты на неактивную энергию. Графики представлены в относительных единицах.

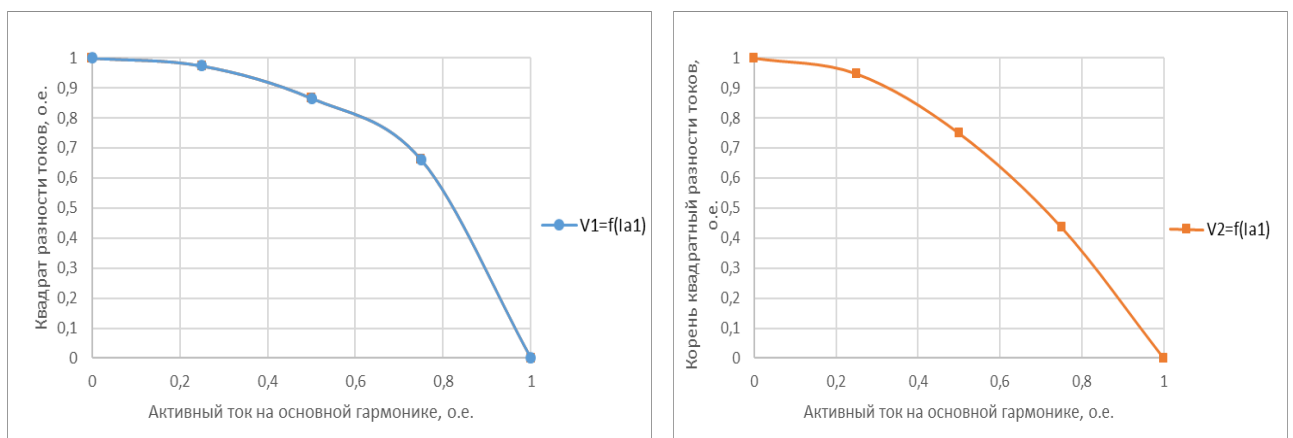


Рисунок 4.6 – Зависимость доли затрат на реактивную энергию от активного тока на основной гармонике

Первый вариант дает преимущество тем, кто существенно уменьшает разницу токов до соотношения  $I/I_a^{(1)} = 0,5$ , а второй вариант позволяет существенно снизить затраты на неактивную мощность после  $I/I_a^{(1)} > 0,5$ .

Таким образом, анализ результатов, полученных в работе позволил сформировать новый подход к учету электроэнергии в части определения реактивной «энергии» [47]: учет потребления электроэнергии должен состоять из учета активной энергии, регистрируемой счетчиками, а вклад реактивной «энергии» должен учитываться интегральным счетчиком тока.

Поскольку учет реактивной мощности будет вестись тем точнее, чем ниже уровень несинусоидальности, то дальнейшие исследования и предложения связаны с улучшением качества электроэнергии посредством фильтрокомпенсирующих устройств [62].

#### **4.4 Применение статических компенсаторов и активных фильтров для уменьшения затрат на электроэнергию**

Совершенствование учёта электроэнергии осуществляется благодаря комплексному подходу. С одной стороны, предложены решения по совершенствованию учёта потребления электроэнергии при имеющемся спектральном составе напряжений и токов. С другой стороны, применение устройств, подавляющих высшие гармоники и компенсирующие реактивную мощность, приводит к уменьшению энергопотребления [34; 62; 96].

К устройствам, предназначенным к снижению уровня несинусоидальности традиционно относят фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) [50; 52; 53], рассчитанные на различные уровни напряжения .

В сетях среднего напряжения широкое распространение получили устройства СТАТКОМ (статические компенсаторы) [56], которые могут выполнять несколько функций одновременно:

- снижать уровень искажений;
- регулировать уровень реактивной мощности;

- поддерживать заданный уровень напряжения, компенсируя его провалы [56].

Независимо выбранного предприятием типа фильтрокомпенсирующего устройства (СТАТСКОМ или силовой активный фильтр) для его работы необходимо определить:

- спектральный состав искаженного напряжения/тока для выявления гармоник, подлежащих подавлению;

- требуемую реактивную мощность ФКУ, необходимую для компенсации реактивной мощности.

Для корректной работы силовых фильтров на предприятиях среднего уровня напряжения 6-10 кВ необходимо не просто определить спектральный состав, а обеспечить минимальную инерционность в системе управления фильтром. Это может быть достигнуто применением модификаций метода преобразования Фурье, которые позволяют быстрее определить гармонический состав напряжения/тока системы.

### **Метод анализа спектра напряжения и тока**

Для соблюдения условий работы фильтр-компенсирующих устройств, а именно обеспечения безынерционности и снижения запаздывания при измерении мгновенной активной мощности предложено решение по определению гармонического состава нагрузки в сетях среднего уровня напряжения 6-10 кВ.

Несинусоидальность в таких сетях чаще всего обусловлена наличием в мощных электроприёмников с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ) [76; 99]. К таким приёмникам, в первую очередь, следует относить частотно-регулируемый электропривод с неуправляемым выпрямителем, выполненным на основе диодного моста [3]. Для спектра потребляемого тока диодного выпрямителя характерны высокие амплитуды 5-ой и 7-ой гармоник, что может приводить к существенному ухудшению формы напряжения участка распределительной сети с относительно низким значением сопротивления

короткого замыкания на входе [22; 88]. Кроме того, возникновение установившихся режимов работы сети с искажённой формой напряжений может быть вызвано развитием аварийных ситуаций в передающем и генерирующем энергооборудовании. Типичными аварийными ситуациями в распределительных сетях являются межфазные короткие замыкания в обмотках трансформаторов и линиях электропередач [39].

Быстрое определение параметров установившегося несинусоидального режима работы сети позволяет эффективно восстанавливать форму напряжения при наличии в сети активных силовых установок, способных брать на себя функции фильтро-компенсирующих устройств, что наиболее актуально для сетей, в которых мощные электроприёмники с нелинейной ВАХ имеют резко-переменный характер нагрузки. К таким устройствам можно отнести динамические компенсаторы семейства FACTS, активные выпрямители в составе электропривода, сетевые инверторы напряжения в составе распределённых генерирующих установок (например, ветрогенераторов) [89]. Кроме того, быстрое определение параметров высших гармонических составляющих позволяет быстро реагировать на аварийные ситуации в сети, для которых характерны искажения формы напряжения на определённых частотах, и с помощью устройств релейной защиты и автоматики изолировать аварийные участки сети [2; 48].

Традиционно для оценки спектрального состава напряжений применяются алгоритмы на основе преобразования Фурье, которое позволяет разложить несинусоидальный периодический сигнал на отдельные синусоиды – гармоники с определённой частотой и амплитудой [83; 86]. Для точной оценки алгоритмы на основе преобразования Фурье требуют анализа сигнала на его полном периоде, что уменьшает время реакции таких алгоритмов до 20мс для сетей с частотой напряжения 50 Гц [93].

В работе предлагается способ оценки спектрального состава системы трёхфазных напряжений, основанный на представлении её в виде

пространственного вектора на ортогональной плоскости, координаты которого вычисляются в соответствии с преобразованием Кларка [60; 68](4.12)

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot [C] \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

где  $u_a, u_b, u_c$  – мгновенные значения напряжений, В;

$u_\alpha, u_\beta$  – координаты пространственного вектора напряжения сети на плоскости  $\alpha\beta$ , В;

$u_0$  – компонент нулевой последовательности, В;

$C$  – матрица преобразования Кларка.

Особенность распределительных сетей 6-10 кВ заключается в трёхпроводной схеме, в которой компонент  $u_0$  отсутствует, что упрощает систему (4.12) до двух уравнений [72].

Выразим пространственный вектор  $\underline{u}$  напряжения сети, что позволит нам применять операции векторного исчисления (4.13)

$$\underline{u} = u_\alpha + ju_\beta = Ue^{j\theta}, \quad (4.13)$$

где  $U$  – модуль (длина) вектора напряжения, В;

$\theta$  – угол поворота вектора напряжения, рад.

Модуль и угол поворота пространственного вектора вычисляются следующим образом (4.14)

$$U = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}; \theta = \text{atan2} \left( \frac{u_\beta}{u_\alpha} \right), \quad (4.14)$$

где  $\text{atan2}$  – функция арктангенса, возвращающая аргумент независимо от знака выражения в скобках.

Преобразование системы синусоидальных напряжений в установившемся режиме к пространственному вектору позволяет выделить несколько особенностей:

- годограф пространственного вектора представляет собой окружность, то есть модуль вектора является постоянной величиной, а угол поворота вектора имеет постоянное приращение;
- модуль пространственного вектора напряжения сети численно равен амплитуде фазных напряжений, а угол поворота пространственного вектора в каждый момент времени численно равен фазе (углу поворота сигнала, представленного на комплексной плоскости) напряжения в фазе А.

Так как преобразование (4.14) является линейной операцией, то представив несинусоидальную систему напряжений в установившемся режиме в виде суммы основной гармоники и высших гармонических составляющих, мы также можем представить пространственный вектор такой системы в виде суммы пространственных векторов основной гармоники и пространственных векторов высших гармонических составляющих.

В работе принято допущение о том, что при анализе пространственного вектора напряжения трёхпроводной сети можно пренебречь:

- второй гармоникой, наличие которой обусловлено несимметрией напряжения сети [87];
- высшими гармониками четных порядков (4, 6, 8...), так как наличие их в спектре распределительных сетей статистически незначительно [77];
- третьей гармоникой, так как она взаимно компенсируется между фазами в трёхпроводной сети [13].

С учётом принятых допущений вектор трёхфазной системы несинусоидальных напряжений в установившемся режиме может быть представлен в следующем виде (4.15)

$$\underline{u} = \underline{u}^{(1)} + \sum_{h=5}^{\infty} \underline{u}^{(h)}, \quad (4.15)$$

где  $h$  – порядок высшей гармоники в спектре напряжения сети.

Рассмотрим суперпозицию вектора основной гармоники и высшей гармонической составляющей на примере 5-ой гармоники. На рисунке 4.7 представлено схематичное изображение суперпозиции рассматриваемых

векторов. Пусть в начальный момент времени углы поворота обоих векторов совпадают, тогда длина вектора  $\underline{u}$  будет максимальной и равной сумме длин векторов  $u^{(1)}$  и  $u^{(5)}$ . Частота вращения вектора  $u^{(5)}$  в 5 раз выше частоты вращения вектора  $u^{(1)}$ , тогда за четверть оборота вектора  $u^{(5)}$  вектор  $u^{(1)}$  поворачивается на  $18^\circ$ . На рисунке 4.7 показаны 5 последующих положений векторов  $u^{(1)}$  и  $u^{(5)}$ , а чёрными точками отмечено положение вектора  $\underline{u}$ , обусловленное сложением векторов.

На рисунке 4.7 можно отметить две важные особенности. Во-первых, максимальная (минимальная) длина вектора  $\underline{u}$  всегда представляет собой сумму (разность) вектора основной и 5-ой гармоник в моменты времени, когда оба вектора лежат на одном луче, направленном из центра координат. Во-вторых, траектория вектора  $\underline{u}$  начинает повторять себя через четверть периода, при этом амплитуда вектора  $\underline{u}$  изменяется по синусоидальному закону вокруг сигнала амплитуды основной гармоники. Проведя численное моделирование в среде MATLAB для гармоник других порядков были установлены две основные зависимости:

1) период колебаний амплитуды вектора напряжения всегда соответствует периоду гармоники  $Th$ , порядок которой –  $h$  – предшествует порядку гармоники  $h+1$ , обуславливающей колебание (4.16)

$$T_{h+1} = T_h + \frac{1}{f(h+1)}. \quad (4.16)$$

2) амплитуда колебания амплитуды вектора напряжения равна амплитуде гармоники, обуславливающей колебания.

На основе полученных зависимостей разработан быстродействующий алгоритм определения спектра напряжения трёхпроводной сети, идеей которого является преобразование системы трёхфазных напряжений к пространственному вектору и определение спектра амплитуд и фаз высших гармоник с помощью применения оконного преобразования Фурье к сигналу амплитуды пространственного вектора.

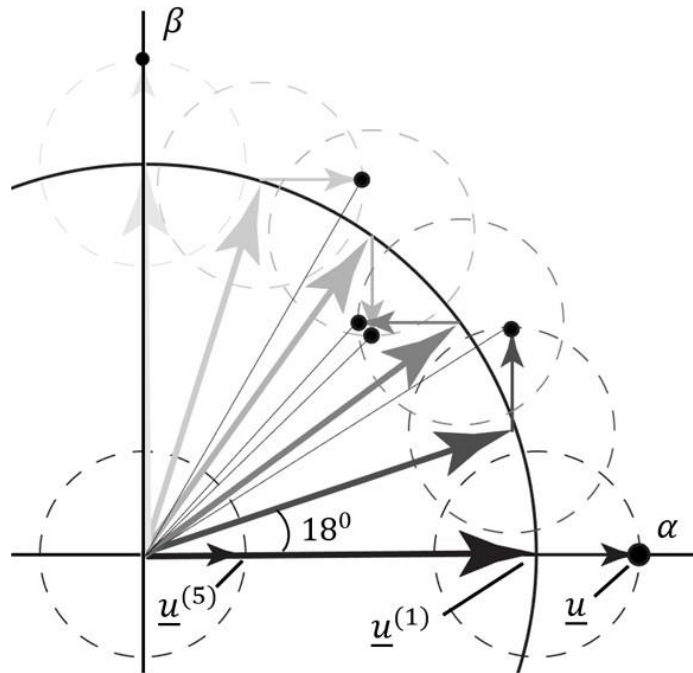


Рисунок 4.7 – Схематичное изображение суперпозиции пространственных векторов основной и пятой гармоник напряжения сети на плоскости  $\alpha\beta$

Полный период 5-ой гармоники равен 4мс, таким образом минимальный период колебания пространственного вектора напряжения сети, на котором можно будет реализовать оконное преобразование Фурье для полного периода колебания амплитуды, обусловленного высшими гармоническими составляющими, согласно выражению (4.16) будет составлять 5мс, исходя из чего и выбран размер окна  $T$  для оконного преобразования Фурье. Выражение для определения спектра напряжения сети по изменениям амплитуды её пространственного вектора будет иметь следующий вид (4.17)

$$U = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=4}^H a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t), \quad (4.17)$$

где  $a_0$  – коэффициент постоянной составляющей сигнала, равный амплитуде основной гармоники напряжения сети;

$a_h$ ,  $b_h$  – коэффициенты реальной и мнимой части  $h$ -ой гармоники при преобразовании Фурье внутри рассматриваемого окна;

$H$  – максимальный порядок гармоники, которую целесообразно анализировать с помощью рассматриваемого алгоритма.

Например, для активных фильтров имеет смысл рассматривать гармонический состав сигнала не выше 20-ой гармоники, так как за счет ограничений динамики, вызванных наличием индуктивностей на входе инвертора, а также индуктивностью линий электропередач, они неспособны реагировать на возмущения с более высокой частотой.

Коэффициенты  $a_h$ ,  $b_h$ ,  $a_0$  определяются следующим образом (4.18)

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cos(h\omega t) dt; b_h = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \sin(h\omega t) dt; a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) dt. \quad (4.18)$$

Исходя из выражений (4.13), (4.14), (4.17) определяем параметры пространственных векторов высших гармоник (4.17)

$$\underline{u}^{(h)} = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \cdot \left[ \cos\left(\omega T - \arctg \frac{b_h}{a_h}\right) + \sin\left(\omega T - \arctg \frac{b_h}{a_h}\right) \right]. \quad (4.18)$$

Приравнивая амплитуду вектора  $u^{(h)}$   $h$ -ой гармоники, полученную в выражении (4.17) к амплитуде гармоники  $h+1$  порядка в спектре сигнала в ABC системе напряжений, мы вычисляем спектр напряжений.

Проверка работоспособности алгоритма была произведена в среде компьютерного моделирования MATLAB/Simulink. Для этого на вход алгоритма подавались мгновенные значения напряжений  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$ , форма которых представлена на рисунке 4.8. Кроме того, на рисунке представлена форма кривой вычисленной амплитуды  $U$  пространственного вектора  $\underline{u}^{(k)}$ . До момента времени 0.04 с напряжения имеют синусоидальную форму, амплитуда пространственного вектора соответственно постоянна.

В момент времени 0.04 с в спектр напряжений добавляется 5-я гармоника с амплитудой 10% от основной, при этом наблюдаются искажения напряжений в ABC системе координат и синусоидальные колебания амплитуды пространственного вектора. В момент времени 0.08 с в спектр напряжения также добавляются 7-я гармоника с амплитудой 10% от основной и 11-я гармоника с амплитудой 5% от DC-составляющей. Форма кривой пространственного вектора искажается.

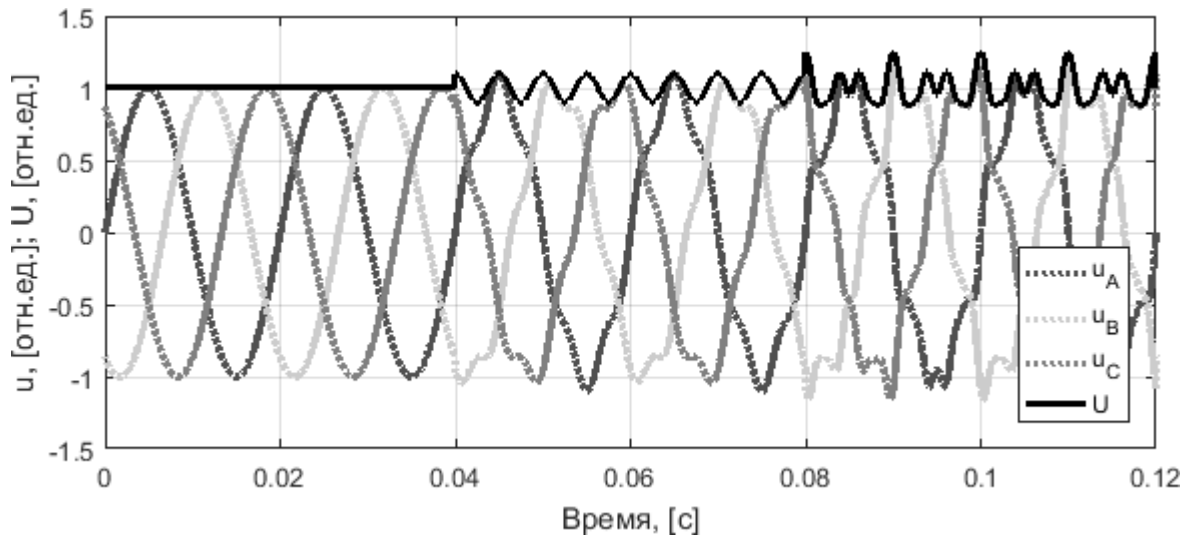


Рисунок 4.8 – Форма сгенерированных сигналов фазных напряжений и вычисленная амплитуда пространственного вектора напряжения сети

На рисунке 4.9 представлены вычисленные в соответствии с оконным преобразованием Фурье (формулы (4.18) и (4.19)) спектры кривой амплитуды пространственного вектора.

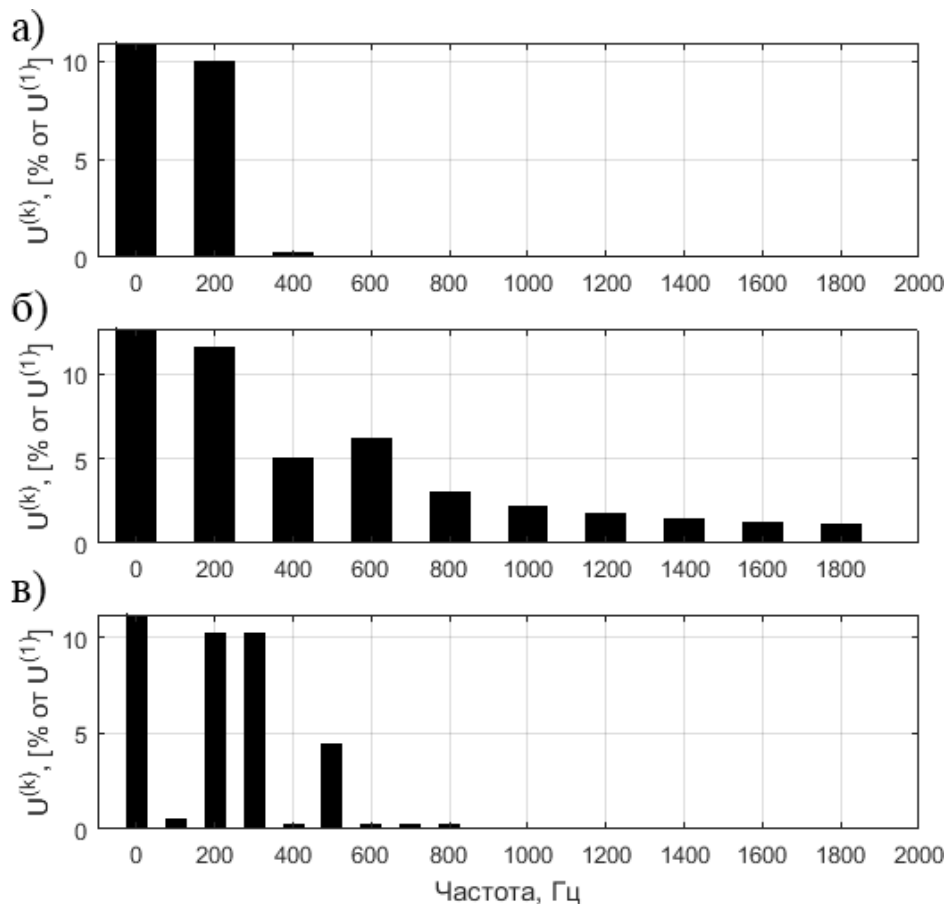


Рисунок 4.9 – Спектр сигнала амплитуды пространственного вектора напряжения сети, вычисленный с помощью преобразования Фурье на окне размером 5 мс:

а) 5-ой, 7-ой и 11-ой, 13-ой и 17-ой гармоник; б) 5-ой, 7-ой, 11-ой, 13 и 17-ой гармоник при учете зеркально отраженного сигнала.

На рисунке 4.9а представлен спектр, вычисленный начиная с момента времени 0.04 с в течение принятого в работе размера окна – 5 мс. Из гистограммы видно, что на частоте 200 Гц, соответствующей 4-ой гармонике входных сигналов напряжения, вычисленная амплитуда синусоидальных колебаний составляет 10%. Используя выведенные в работе закономерности, можно сказать, что данная амплитуда соответствует 5-ой гармонике исходного напряжения, что соответствует исходному сигналу.

На рисунке 4.9б представлен спектр, вычисленный начиная с момента времени 0.08 с в течение принятого в работе размера окна – 5 мс. Из гистограммы видно, что вычисленный спектр содержит гармоники, отсутствующие в исходном сигнале. Причиной данного явления является тот факт, что на рассматриваемом промежутке в 5мс наложение нескольких гармонических составляющих приводит к тому, что график амплитуды пространственного вектора оказывается симметричен по полупериодам в 10мс, внутри которых четверти периода оказываются зеркально отражены. Дальнейшее моделирование показало, что данная зависимость характерна для произвольных комбинаций высших гармоник в спектре сигнала, что позволило доработать алгоритм, для вычисления спектра амплитуды пространственного вектора напряжения с учётом добавления к концу рассматриваемого на промежутке 5 мс сигнала его зеркально отражённой копии. Результат вычисления спектра такого сигнала представлен на рисунке 4.9в. Из рисунка видно, что гармоникам с частотами 200 и 300 Гц (4 и 6 порядок) соответствует амплитуда 10% от DC-составляющей, а гармонике на частоте 500 Гц (10 порядок) соответствует амплитуда 5% от DC-составляющей. Увеличение порядка гармоник на один позволяет восстановить спектр напряжения в АВС системе координат.

Таким образом, в работе выведены три зависимости, описывающие свойства пространственного вектора напряжения и позволившие разработать алгоритм быстрого определения спектрального состава симметричной системы

несинусоидальных напряжений трёхпроводной распределительной сети [25]. Преобразование системы напряжений к пространственному вектору позволяет использовать сигнал амплитуды вычисленного вектора как опорную величину, при этом значение его DC-составляющей будет соответствовать амплитуде основной гармоники напряжения сети, что исключает необходимость анализировать сигналы напряжений на периоде напряжения сети (20 мс для частоты напряжения в сети 50 Гц). Для трёхпроводной сети был установлен минимальный размер окна, на котором предлагаемый алгоритм способен точно оценить спектр напряжения сети, равный четверти периода – 5 мс.

#### 4.5 Алгоритм учета потребления электроэнергии

По результатам всей работы представляется возможным сформировать алгоритм учета потребления электроэнергии при наличии искажений в электротехнических комплексах предприятий (рисунок 4.10).

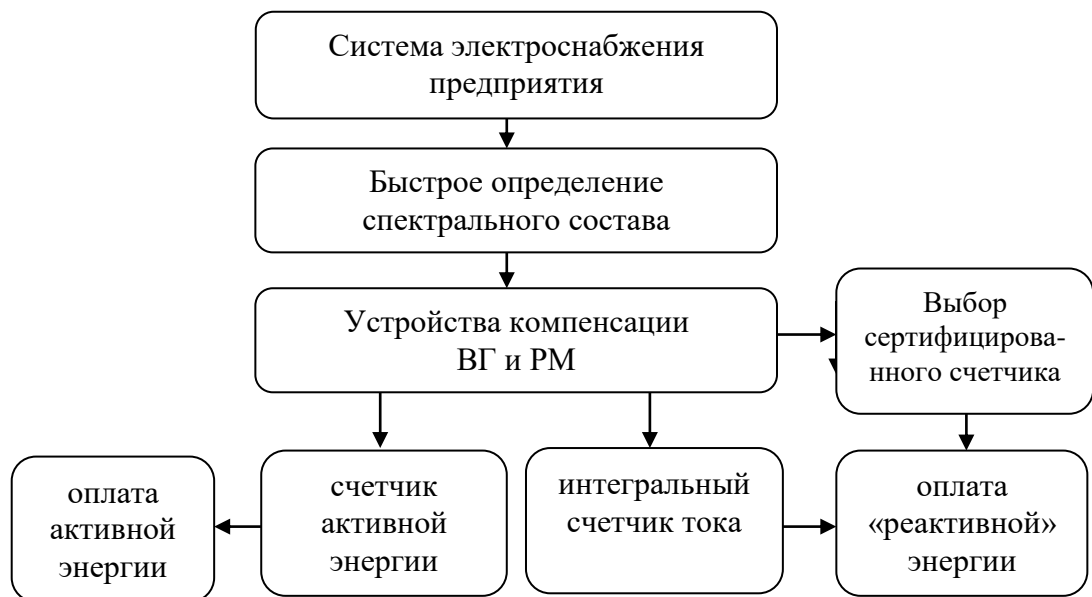


Рисунок 4.10 – Алгоритм учета электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий при наличии искажений

Учет электроэнергии будет вестись тем корректнее, чем ниже уровень искажений в сети, на что направлено применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). С этой точки зрения предлагается усовершенствовать работу ФКУ, в системе управления которых закладывается математический аппарат для определения спектрального состава напряжений и токов. При этом ФКУ должны

обладать низкой инерционностью, то есть запаздывание должно стремиться к нулю.

Результаты и выводы, представленные выше, позволили разработать алгоритм учета электроэнергии, который пошагово заключается в следующем (рисунок 4.10):

1. учет активной мощности ведется по всем гармоникам, с учетом знака активной мощности;

2. учет реактивной энергии:

- ведется по интегральному показателю тока или

- определяется модуль полного сопротивления системы и соотношение его активной и реактивной составляющих;

- согласно полученному соотношению, выбирается счетчик реактивной мощности, работа которого в данных условиях будет проводиться более корректно;

3. в систему управления фильтрокомпенсирующими устройствами вводится математический аппарат с быстрым преобразованием Фурье для повышения быстродействия работы фильтров и повышения качества электроэнергии.

#### 4.6 Выводы по Главе 4

Выявлено, что при классическом подходе разложения полной мощности на активную и реактивную происходит переплата за потребление активной энергии, поскольку в неё входит «мощность искажений». Первый шаг по совершенствованию учёта потребления электроэнергии это вести учет активной мощности на основной частоте. Второй шаг заключается в учете реактивной «энергии» через предложенный интегральный показатель тока.

Анализ полученных графиков  $THDu$  в функции от токов линейной и нелинейной нагрузки позволяет сделать следующие выводы:

✓ при наличии на предприятии чисто линейной нагрузки, поступающие из внешней сети высшие гармоники не влияют на общее значение суммарного

коэффициента искажения по напряжению, что позволяет при его определении не учитывать искажения, возникающие в линейной нагрузке;

✓ применение при расчете  $THDi$  номинального напряжения  $U_{ном}$  вместо  $U^{(1)}$  может привести к погрешности не превышающей 15%, что может оказаться приемлемым в некоторых случаях, определяемых потребителем.

Разработан новый подход к учету электроэнергии в части определения реактивной «энергии»: учет потребления электроэнергии должен состоять из учета активной энергии, регистрируемой счетчиками, а вклад реактивной «энергии» должен учитываться интегральным счетчиком тока.

Поскольку учет реактивной мощности будет вестись тем точнее, чем ниже уровень несинусоидальности, то необходимо предварительно проводить предиктивный анализ спектрального состава напряжения и тока предложенным методом быстрого преобразования Фурье, что позволяет снизить инерционность в работе фильтров. Этот дополнительный фактор повышает качество электроэнергии, а значит расширяет область применения сертифицированных счетчиков, а в случае принятия к учету интегрального показателя тока, данные также будут учтены более корректно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – совершенствование учета электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий при наличии высших гармоник.

По результатам диссертационной работы сделаны следующие выводы и представлены следующие рекомендации:

1. Выполненный анализ параметров СЭС среднего напряжения позволил выявить диапазон изменения полного сопротивления системы для сетей централизованного и автономного питания в пределах от 0,1 до 2 Ом по модулю при изменении его активной и реактивной составляющих в отношении от 0,1 до 5;

2. Выявлено, что нормативные документы, определяющие ограничения величин токов короткого высших гармоник в сетях среднего напряжения учитывают лишь модуль сопротивления системы, принимая его значение в качестве индуктивного сопротивления на первой гармонике. Установлено, что неучет отношения активной к реактивной составляющей полного сопротивления системы через введенный в работе показатель  $k_Z^{(h)} = R_S / X_S^{(h)}$  может привести к ошибке в определении  $THD_U$  в любой точке СЭС, оцениваемой относительной ошибкой в 300%;

3. Установлено, что применение для учета электроэнергии сертифицированных счетчиков по активной энергии дают показания, соответствующие физике процесса ее потребления, а счетчики реактивной «энергии», которые определяют ее по разным формулам (4.1) и (4.2), дают некорректные показания, которые невозможно сравнить с эталоном по причине отсутствия понятия «реактивной мощности при наличии высших гармоник»;

4. Разработан алгоритм, согласно которому следует осуществлять выбор тех или иных счетчиков реактивной «энергии» в зависимости от введенного вновь показателя  $k_Z^{(h)}$  и модуля полного сопротивления системы, характеризующимся

либо относительным значением тока короткого замыкания или мощностью короткого замыкания;

5. Выявлено, что при модуле полного сопротивления от 0,5 до 2 происходит выравнивание значения THDU к минимальному значению при  $k_Z^{(h)}$  больше 5, но тем не менее применять формулу (4.2) уже нельзя, поскольку THDU в разы превышает нормированный уровень в 5%. В этом случае целесообразным становится применение лишь формулы (4.1), учитывающей вклад гармоник. При модуле полного сопротивления до 0,5 выбор в пользу формул (4.1) и (4.2) определяется значением модуля полного сопротивления системы;

6. Разработан новый алгоритм учета электроэнергии в сети, содержащей высшие гармоники. Основой алгоритма является применение вновь введенного интегрального показателя тока, по которому предлагается оценивать реактивную мощность. Доказано, что введенный показатель адекватно отражает суть увеличения тока в линии при наличии искажений;

7. Разработан метод определения спектра высших гармоник на интервале меньше одного периода основной частоты на основе быстрого преобразования Фурье (получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617533). На основе данного программного комплекса представляется возможным проведение промежуточного анализа спектрального состава сети, который позволяет увеличить быстродействие работы ФКУ, что влияет на качество электроэнергии и, как следствие, ее потребление;

8. Разработана компьютерная программа, позволяющая исследовать трехфазные электрические и магнитные цепи (получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614230). С помощью данного программного комплекса также можно проводить исследования параметров цепи, необходимых для совершенствования модели, а также расширить область дальнейшего исследования;

9. Разработана имитационная модель, отображающая полученные аналитические результаты исследований и подтверждающая корректность полученных выражений и результатов;

10. Получен акт о внедрении результатов исследования в образовательный процесс Горного университета и справка о внедрении результатов в производственную деятельность ООО «АСТЕРО».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артюхов, И.И.* Неоднозначность методов измерения реактивной мощности в промышленных сетях переменного тока / И.И. Артюхов, А.А. Львов, М.А. Соломин // сборник трудов IV Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015)». – С. С. 165-174.
2. *Басс, Э.И.* Релейная защита электроэнергетических систем / Э.И. Басс, В.Г. Дорогунцев // М.: Издат. дом МЭИ. 2006. – 2006. – С. 296.
3. *Валиуллина, З.* Особенности проектирования силовых выпрямителей в качестве источников постоянного тока для тиристорных преобразователей повышенной частоты / З. Валиуллина, А. Есаулов, А. Егоров, Ю. Зимин // иловая электроника. 2008. №3. – 2013. – Т. 3 – № 8.
4. ГОСТ 4.392-85 Система показателей качества продукции (СПКП). Счетчики электрической энергии. Номенклатура показателей, ГОСТ от 20 декабря 1985 года №4.392-85 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200010506/> (дата обращения: 22.05.2019).
5. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009) Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств (с Поправкой), ГОСТ от 22 июля 2013 года №30804.4.7-2013 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103652> (дата обращения: 16.06.2019).
6. ГОСТ 31818.11-2012 (IEC 62052-11:2003) Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Общие требования. Испытания и условия испытаний. Часть 11. Счетчики электрической энергии (Издание с Поправкой), ГОСТ от 22 ноября 2012 года №31818.11-2012 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200098803/> (дата обращения: 22.06.2019).
7. ГОСТ 31819.23-2012 (IEC 62053-23:2003) Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Часть 23.

- Статические счетчики реактивной энергии, ГОСТ от 22 ноября 2012 года №31819.23-2012 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200098807/> (дата обращения: 31.03.2019).
8. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, ГОСТ от 22 июля 2013 года №32144-2013 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 16.06.2019).
  9. ГОСТ Р 54130-2010 Качество электрической энергии. Термины и определения, ГОСТ Р от 21 декабря 2010 года №54130-2010 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088552> (дата обращения: 22.05.2019).
  10. ГОСТ IEC 61000-4-30-2017 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии, ГОСТ от 14 декабря 2017 года №IEC 61000-4-30-2017 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200157898> (дата обращения: 16.06.2019).
  11. ГОСТ IEC 62053-61-2012 Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Дополнительные требования. Часть 61. Требования к потребляемой мощности и напряжению, ГОСТ от 28 августа 2013 года №IEC 62053-61-2012 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103632> (дата обращения: 31.03.2019).
  12. *Добуш, В.С.* Определение влияния угла сдвига фаз на высших гармониках на режим работы устройств поперечной компенсации / В.С. Добуш, Т.В. Пудкова // Материалы международной научно-практической конференции, - Институт энергетики и транспортных систем. Ч.2. – СПб, ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. – 2018. – С. 87–89.
  13. *Жежеленко, И.В.* Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 1974.
  14. *Жежеленко, И.В.* Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – 2000.

15. *Жежеленко, И.В.* Физический смысл понятия «Реактивная мощность» применительно к трехфазным системам электроснабжения с нелинейной нагрузкой [Электронный ресурс] / И.В. Жежеленко, Т.Д. Васильевич // Электротехника и электромеханика. – Украина, Харьков: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2015. – № 6. URL:  
<https://cyberleninka.ru/article/n/fizicheskiy-smysl-ponyatiya-reaktivnaya-moschnost-primenitelno-k-trehfaznym-sistemam-elektrosnabzheniya-s-nelineynoy-nagruzkoj> (дата обращения: 23.06.2019).
16. *Железко, Ю.С.* Новые нормативные документы, определяющие взаимоотношения сетевых организаций и покупателей электроэнергии в части условий потребления реактивной мощности [Электронный ресурс] / Ю.С. Железко // Электрические Станции. – Научно-техническая фирма «Энергопрогресс», 2008. – № 5. URL:  
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11718970> (дата обращения: 23.06.2019).
17. *Железко, Ю.С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов [Электронный ресурс] / Ю.С. Железко. URL:  
[https://www.studmed.ru/zhelezko-yus-poteri-elektroenergii-reaktivnaya-moschnost-kachestvo-elektroenergii-rukovodstvo-dlya-prakticheskikh-raschetov\\_a1084e2e799.html](https://www.studmed.ru/zhelezko-yus-poteri-elektroenergii-reaktivnaya-moschnost-kachestvo-elektroenergii-rukovodstvo-dlya-prakticheskikh-raschetov_a1084e2e799.html) (дата обращения: 23.06.2019).
18. *Жемеров, Г.Г.* Теория мощности Фризе и современные теории мощности [Электронный ресурс] / Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина. – НТУ «ХПИ», 2007. URL:  
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/11850> (дата обращения: 23.06.2019).
19. *Иванченко, Д.И.* Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2019614230. Российская Федерация. Программный лабораторный комплекс для исследования трехфазных электрических и магнитных цепей: № 2019614230; заявл. 19.03.2019; опублик. 01.04.2019 Бюл. №4 / Д.И. Иванченко, В.Ю. Коптев, Т.В. Пудкова. – С. 1.

20. ИКЭС-РД-052-2017 Методика контроля качества электрической энергии, перемещаемой по межгосударственным линиям электропередачи, и определение источника нарушений (искажений) показателей качества электрической энергии, НТД от 4 ноября 2017 года.
21. *Карташев, И.И.* Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов. – Издательский дом МЭИ, 2017. – 2017. – 347 с.
22. *Коровин, Ю.В.* Расчёт токов короткого замыкания в электрических системах / Ю.В. Коровин, Е.И. Пахомов, К.Е. Горшков // Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 2011. 114 с. – 2014. – С. 114.
23. *Крыльцов, С.Б.* Применение свойств пространственного вектора при анализе качества напряжения распределительной сети 6-10 кВ [Электронный ресурс] / С.Б. Крыльцов, Т.В. Пудкова // Известия Тульского Государственного Университета. Технические Науки. – Тульский государственный университет, 2017. – № 12–2. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30766824> (дата обращения: 26.06.2019).
24. *Крыльцов, С.Б.* Быстрое определение спектра несинусоидальных напряжений в распределительной сети 6-10 кВ / С.Б. Крыльцов, Т.В. Пудкова // Известия Тульского Государственного Университета. Технические Науки. – Тульский государственный университет, 2017. – № 12–2 – С. 497–506.
25. *Крыльцов, С.Б.* Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2017617533. Российская Федерация. Программа быстрого определения спектрального состава симметричной трёхфазной системы несинусоидальных напряжений: № 2017617533; заяв. 17.05.2017; опубл. 06.07.2017 / С.Б. Крыльцов, Т.В. Пудкова. – С. 1.
26. *Малышева, А.В.* О Проблемах Энергосбережения И Эффективности Двухтарифных Счетчиков [Электронный ресурс] / А.В. Малышева, Л.Н. Козина // Вестник Нгизи. – Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2015. – № 2 (45). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23196194> (дата обращения: 23.05.2019).

27. Мелентьев, В.С. Анализ погрешности метода измерения интегральных характеристик, обусловленной отклонением формы сигнала от гармонической модели / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Вестн Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2(31) (2013). – 2013. – С. 80–84.
28. Нос, О.В. Технические средства повышения энергоэффективности систем электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса / О.В. Нос, М.А. Дыбко. – 2019. – № 5 – С. 82–86. DOI:10.17580/gzh.2019.05.16.
29. О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, Приказ Минэнерго России от 23 июня 2015 года №380 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/420285270/> (дата обращения: 31.03.2019).
30. Об утверждении Методических указаний по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения), Приказ ФСТ России от 31 августа 2010 года №219-э/6 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/902234295> (дата обращения: 22.05.2019).
31. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации (с изменениями на 26 июля 2019 года), Федеральный закон от 23 ноября 2009 года №261-ФЗ [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/902186281/> (дата обращения: 22.05.2019).
32. Приказ ФСТ РФ от 31.08.2010 N 219-э/6 "Об утверждении Методических указаний по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения

- потребления активной и реактивной мощности / КонсультантПлюс [Электронный ресурс] . URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_105613/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_105613/) (дата обращения: 23.05.2019).
33. Пудкова, Т.В. Методы выделения высших гармонических составляющих из сигналов токов и напряжений трёхфазной сети / Т.В. Пудкова // «Современная наука и практика». – 2016. – № 5 (10) – С. 19–23.
34. Пудкова, Т.В. Перспективы использования сетевых инверторов напряжения в составе силовых установок для повышения показателей качества напряжения распределительной сети / Т.В. Пудкова, С.Б. Крыльцов // «Вестник научных конференций», Тамбов. – 2017. – С. 97–98.
35. Пудкова, Т.В. Применение принципов учета электроэнергии согласно теории мощности при наличии искажений [Электронный ресурс] / Т.В. Пудкова, А.И. Барданов, В.С. Добуш // Известия Тульского Государственного Университета. Технические Науки. – Тульский государственный университет, 2019. – № 9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41562113> (дата обращения: 26.06.2019).
36. Пудкова, Т.В. Сравнительный анализ различных подходов к определению составляющих полной мощности при наличии в сети высших гармоник / Т.В. Пудкова, Пастухова, А.А., Левчук, Д.И. // Сборник международного семинара «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME – 2019». – 2019, - с. 460-465.
37. Розанов, Ю.К. Применение аппарата нечеткой логики для улучшения динамических характеристик гибридных фильтров высших гармоник [Электронный ресурс] / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, М.И. Смирнов, Р.П. Гринберг // Электричество. – Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2007. – № 1. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12840940> (дата обращения: 23.05.2019).
38. Росстандарт [Электронный ресурс] . URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/> (дата обращения: 31.03.2019).

39. *Сардалов, Р.Б.* Методы оценки надежности систем энергоснабжения / Р.Б. Сардалов, Е.Ю. Логинова // Образовательная среда сегодня и завтра. Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции. 2014. – 2014. – С. С. 343-346.
40. *Смирнов, С.С.* Метод определения фактических вкладов сети и потребителя в коэффициенты высших гармоник напряжения узла [Электронный ресурс] / С.С. Смирнов // Электричество. – Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2005. – № 10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12936298> (дата обращения: 23.05.2019).
41. *Смирнов, С.С.* Метод оценки вклада мощной искажающей нагрузки в коэффициенты высших гармоник напряжения сети высокого напряжения [Электронный ресурс] / С.С. Смирнов // Электричество. – Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2008. – № 8. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12897247> (дата обращения: 23.05.2019).
42. *Смирнов, С.С.* Свойства активных мощностей гармоник искажающих нагрузок [Электронный ресурс] / С.С. Смирнов // Электричество. – Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2010. – № 9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15183664> (дата обращения: 23.05.2019).
43. *Смирнов, С.С.* Высшие гармоники в сетях высокого напряжения [Электронный ресурс] / С.С. Смирнов. – Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука». URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19578415> (дата обращения: 23.05.2019).
44. СТБ МЭК 61000-2-4-2005 (IEC 61000-2-4:2002, IDT) Электромагнитная совместимость. Часть 2-4. Условия окружающей среды. Уровни совместимости в промышленных установках для низкочастотных кондуктивных помех, ГОСТ от 29 ноября 2005 года.

45. Управление качеством электрической энергии [Электронный ресурс] . URL: <https://docplayer.ru/68278698-Upravlenie-kachestvom-elektricheskoy-energii.html> (дата обращения: 23.05.2019).
46. *Чижма, С.Н.* Совершенствование методов и средств контроля качества электроэнергии и составляющих мощности в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой: дис. ... Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / С.Н. Чижма. – ОмГТУ, 2014. – 329 с.
47. *Шклярский, Я.Э.* К вопросу оплаты предприятиями потребляемой электроэнергии при наличии искажений в сети / Я.Э. Шклярский, Т.В. Пудкова, Е.О. Замятин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 9.
48. *Шнеерсон, Э.М.* Цифровая релейная защита. / Э.М. Шнеерсон // М.: Энергоатомиздат. 2007. – 2007. – С. С. 549.
49. *Яковлева, Э.В.* Анализ перспектив регионального развития интеллектуальных энергетических систем [Электронный ресурс] / Э.В. Яковлева, Е.В. Сизякова, П.В. Иванов, Ю.Л. Жуковский, Т.В. Пудкова // Российский Экономический Интернет-Журнал. – Институт исследования товародвижения и конъюнктуры оптового рынка, 2018. – № 2. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35338028> (дата обращения: 26.05.2019).
50. *Akagi, H.* Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae. – 1983. – Т. 2 – С. 1375–1386.
51. *Akagi, H.* Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society). – 1983. – С. 825–830.
52. *Akagi, H.* Active filters for suppressing harmonics using multiple voltage source type PWM converters / H. Akagi, S. Atoh, A. Nabae, Y. Abe, Y. Kuroda, K. Hasegawa // Electrical Engineering in Japan. – 1985. – Т. 105 – № 5 – С. 42–50. DOI:10.1002/eej.4391050506.

53. *Akagi, H.* Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters / H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1986. – T. IA-22 – № 3 – C. 460–465. DOI:10.1109/TIA.1986.4504743.
54. *Arrillaga, J.* Power system harmonics / J. Arrillaga, N.R. Watson. – John Wiley & Sons, 2004.
55. *Artyukhov, I.I.* A method of reactive power measurement in industrial alternative current mains supply / I.I. Artyukhov, M.A. Solomin, E.V.L. L’Vova // Conference Proceedings - 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2016,. – C. PP. 1-6.
56. *Bardanov, A.I.* Control of D-STATCOM for asymmetric voltage dips compensation / A.I. Bardanov, T.V. Pudkova // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. – 2019. – C. 430–433. DOI:10.1109/EIConRus.2019.8657254.
57. *Czarnecki, L.S.* Minimisation of distortion power of nonsinusoidal sources applied to linear loads. / L.S. Czarnecki // IEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution. – 1981. – T. 128 – № 4 – C. 208–210. DOI:10.1049/ip-c.1981.0034.
58. *Czarnecki, L.S.* Measurement Principle of a Reactive Power Meter for Nonsinusoidal Systems / L.S. Czarnecki // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1981. – T. IM-30 – № 3 – C. 209–212. DOI:10.1109/TIM.1981.6312380.
59. *Czarnecki, L.S.* Measurement of the Individual Harmonics Reactive Power in Nonsinusoidal Systems / L.S. Czarnecki // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1983. – T. 32 – № 2 – C. 383–384. DOI:10.1109/TIM.1983.4315083.
60. *Czarnecki, L.S.* An orthogonal decomposition of the current of non-sinusoidal voltage sources applied to non-linear loads / L.S. Czarnecki // International Journal of Circuit Theory and Applications. – 1983. – T. 11 – № 2 – C. 235–239. DOI:10.1002/cta.4490110209.

61. *Czarnecki, L.S.* Considerations on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situations / L.S. Czarnecki // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1985. – T. 34 – № 3 – C. 399–404. DOI:10.1109/TIM.1985.4315358.
62. *Czarnecki, L.S.* Methods of reactive power compensation and suppression of load-generated harmonics / L.S. Czarnecki, O.T. Tan // Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON. – 1990. – T. 2 – C. 659–663.
63. *Czarnecki, L.S.* Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents / L.S. Czarnecki // Electrical Engineering. – 1997. – T. 80 – № 6 – C. 359–367. DOI:10.1007/BF01232925.
64. *Czarnecki, L.S.* Working and reflected active powers of three-phase loads / L.S. Czarnecki, T.N. Touns // 12th Conference-Seminar: International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, ISNCC 2015 - Conference Proceedings. – 2015. DOI:10.1109/ISNCC.2015.7174698.
65. *Czarnecki, L.S.* What is wrong with the conservative power theory (CPT) / L.S. Czarnecki // 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2016 - Proceedings. – 2016. DOI:10.1109/ICATE.2016.7754619.
66. *Davis, E.J.* Harmonic pollution metering: Theoretical considerations / E.J. Davis, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi // 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, PES 1999 - Conference Proceedings. – 1999. – T. 1 – C. 367–372. DOI:10.1109/PSS.1999.784376.
67. *Depenbrock, M.* Formulating requirements for a universally applicable power theory as control algorithm in power compensators / M. Depenbrock, D.A. Marshall, J.D. Van Wyk // European Transactions on Electrical Power. – 1994. – T. 4 – № 6 – C. 445–454. DOI:10.1002/etep.4450040602.
68. *Dobrucky, B.* Using Complex Conjugated Magnitudes-and Orthogonal Park/Clarke Transformation Methods of DC/AC/AC Frequency Converter / B. Dobrucky, P. Spanik, M. Benova // Elektronika ir Elektrotechnika. 2009. V. 93(5). – C. P. 29-34.

69. *Emanuel, A.E.* Energetical factors in power systems with nonlinear loads / A.E. Emanuel // Archiv für Elektrotechnik. – 1977. – T. 59 – № 3 – C. 183–189. DOI:10.1007/BF01407310.
70. *Emanuel, A.E.* Apparent power: Components and physical interpretation / A.E. Emanuel // Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP. – 1998. – T. 1 – C. 1–13. DOI:10.1109/ICHQP.1998.759831.
71. *Emanuel, A.E.* Non-sinusoidal reactive power and its impact on smart meter infrastructure in the era of smart grid / A.E. Emanuel // IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2012. DOI:10.1109/PESGM.2012.6345138.
72. *Faria, J.A.B.* On the modal analysis of asymmetrical three-phase transmission lines using standard transformation matrices / J.A.B. Faria, J.H. Briceno // IEEE Transactions on Power Delivery. 1997. V. 12(4). – C. P. 1760-1765.
73. *Filipski, P.* A New Approach to Reactive Current and Reactive Power Measurement in Nonsinusoidal Systems / P. Filipski // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1980. – T. 29 – № 4 – C. 423–426. DOI:10.1109/TIM.1980.4314972.
74. *Filipski, P.* The Measurement of Distortion Current and Distortion Power / P. Filipski // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1984. – T. 33 – № 1 – C. 36–40. DOI:10.1109/TIM.1984.4315148.
75. *Filipski, P.* Power Components in a System with Sinusoidal and Nonsinusoidal Voltage And/Or Currents / P. Filipski // IEE Proceedings B: Electric Power Applications. – 1989. – T. 136 – № 2 – C. 90. DOI:10.1049/ip-b.1989.0011.
76. *Grady, M.* Understanding power system harmonics / M. Grady // Department of Electrical & Computer Engineering, University of Texas at Austin. 2012. – 2012. – C. 185 p.
77. *Hamman, J.* Voltage harmonics generated by voltage-fed inverters using PWM natural sampling / J. Hamman, F.S. Van Der Merwe // IEEE Transactions on power electronics. 1988. V.3(3). – C. P. 297-302.
78. IEC 62586-2-2017 Power quality measurement in power supply systems - Part 2: Functional tests and uncertainty requirements, Измерение качества электрической

энергии в системах электропитания - Часть 2: Функциональные испытания и требования неуверенности - Выпуск 2.0, Международный (зарубежный) стандарт от 01 марта 2017 года №62586-2 [Электронный ресурс] . URL: <http://docs.cntd.ru/document/440166613> (дата обращения: 16.06.2019).

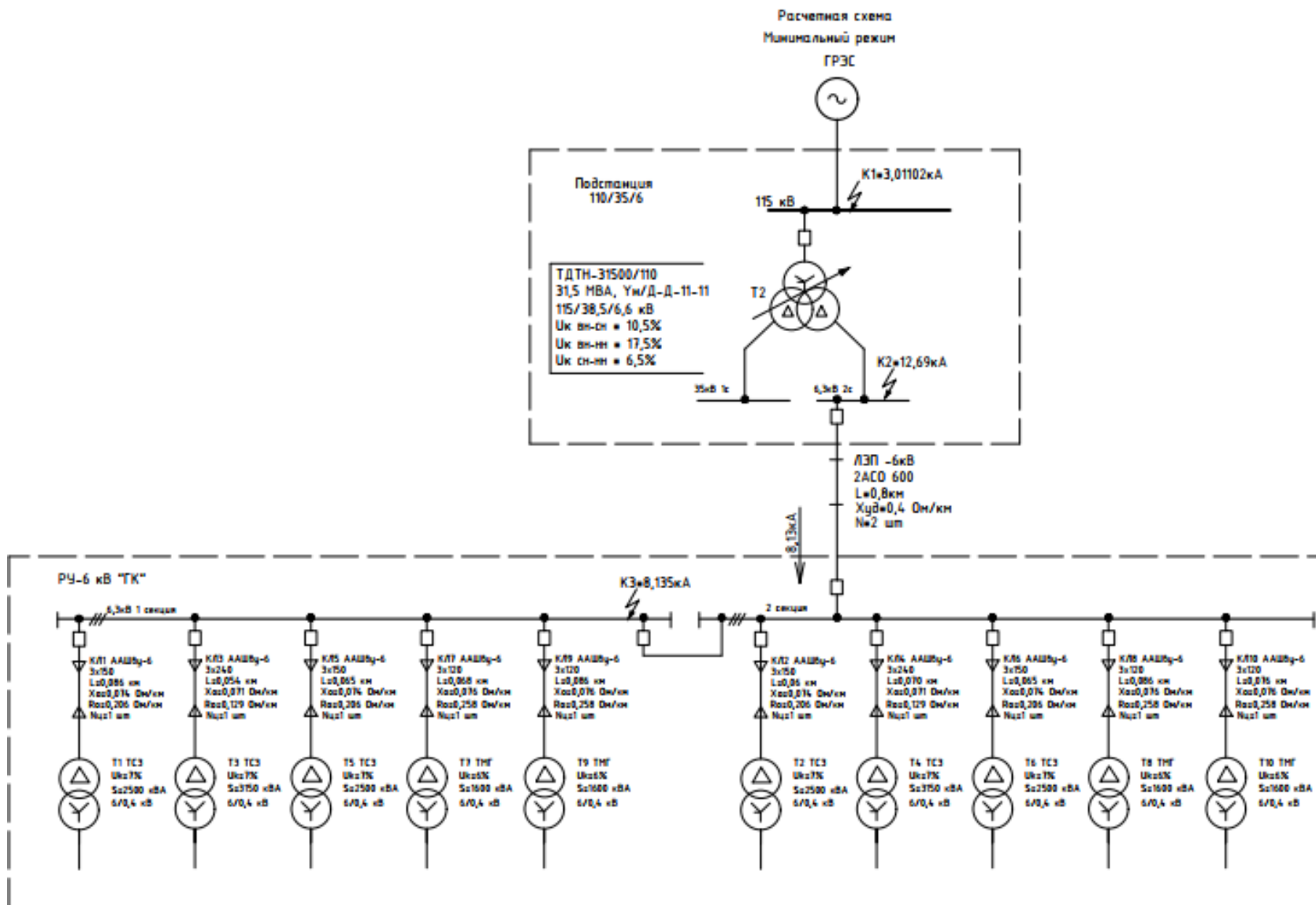
79. IEEE Std 519<sup>TM</sup>-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – P. 29.
80. IEEE Std 1159<sup>TM</sup>-2009, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. – P. 91.
81. IEEE Std 1459-2010, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – P. 52.
82. *Jeltsema, D.* Budeanu's concept of reactive and distortion power revisited [Электронный ресурс] / D. Jeltsema // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – Т. R. 92, nr 4. DOI:10.15199/48.2016.04.17.
83. *Katoh, K.* MAFFT: a novel method for rapid multiple sequence alignment based on fast Fourier transform / K. Katoh, R. Misawa, K.I. Kuma, T. Miyata // Nucleic acids research. 2002. V. 30(14). – С. P. 3059-3066.
84. *Kimbark, E.W.* Power System Stability [Электронный ресурс] / E.W. Kimbark. – 1995.
85. *Kusters, N.L.* On the definition of reactive power under non-sinusoidal conditions. / N.L. Kusters, W.J.M. Moore. – 2017.
86. *Kwok, H.K.* Improved instantaneous frequency estimation using an adaptive short-time Fourier transform / H.K. Kwok, D.I. Jones // IEEE transactions on signal processing. (2000). V. 48(10). – С. P. 2964-2972.
87. *Lopez, J.* Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips / J. Lopez // IEEE Transactions on Energy conversion. 2008. V. 23(1). – С. P. 321-330.
88. *Mezhiba, A.V.* Impedance characteristics of power distribution grids in nanoscale integrated circuits / A.V. Mezhiba, E.G. Friedman // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2004. V. 12(11). – С. PP. 1148-1155.

89. *Muyeen, S.M.* A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements / S.M. Muyeen, R. Takahashi, T. Murata, J.A. Tamura // IEEE Transactions on power systems. 2010. V. 25(1). – 2010.
90. *Nos, O.V.* The instantaneous power quaternion of the three-phase electric circuit with linear load / O.V. Nos, A. Dudin, T. Ellinger, J. Petzoldt. – 2016. – C. 526–531. DOI:10.1109/EDM.2016.7538792.
91. *Orr, J.A.* Current harmonics, voltage distortion, and powers associated with electric vehicle battery chargers distributed on the residential power system. / J.A. Orr, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi // Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society). – 1983. – C. 927–933.
92. *Orr, J.A.* Design of a system for automated measurement and statistics calculation of voltage and current harmonics / J.A. Orr, D. Cyganski, A.E. Emanuel, R.T. Saleh // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1986. – T. 1 – № 4 – C. 23–30. DOI:10.1109/TPWRD.1986.4308026.
93. *Ozaktas, H.M.* The fractional Fourier transform / H.M. Ozaktas, M.A. Kutay // Control Conference (ECC), 2001 European. IEEE. 2001. – C. P. 1477-1483.
94. *Page, C.H.* Reactive Power in Nonsinusoidal Situations / C.H. Page // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1980. – T. 29 – № 4 – C. 420–423. DOI:10.1109/TIM.1980.4314971.
95. *Pajić, S.* A comparison among apparent power definitions / S. Pajić, A.E. Emanuel // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES. – 2006. DOI:10.1109/pes.2006.1709221.
96. *Peng, F.Z.* A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems —A combined system of series active and shunt passive filters— / F.Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1989. – T. 109 – № 12 – C. 897–904. DOI:10.1541/ieejias.109.897.
97. *Pileggi, D.J.* Prediction of harmonic voltages in distribution systems. / D.J. Pileggi, N.H. Chandra, A.E. Emanuel // Radiophysics and Quantum Electronics (English Translation of Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Radiofizika). – 2017.

98. *Pudkova, T.V.* Impact of the network topology on the power quality indicators / Pudkova, T.V. // «Scientific reports on resource issues». – 2016. – № 6 – C. 494–500.
99. *Saha, S.* Harmonics Analysis of Power Electronics Loads / S. Saha, S. Das, C. Nandi // International Journal of Computer Applications. 2014. V. 92(10). – C. P.32-36.
100. *Sharon, D.* Reactive-power definitions and power-factor improvement in nonlinear systems. / D. Sharon // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1973. – T. 120 – № 6 – C. 704–706. DOI:10.1049/piee.1973.0155.
101. *Sharon, D.* Power quality factor for networks supplying unbalanced nonlinear loads / D. Sharon, J.-C. Montaño, A. López, M. Castilla, D. Borrás, J. Gutiérrez // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – T. 57 – № 6 – C. 1268–1274. DOI:10.1109/TIM.2007.915146.
102. *Shepherd, W.* Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems. / W. Shepherd, P. Zakikhani // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1973. – T. 120 – № 7 – C. 796–798. DOI:10.1049/piee.1973.0173.
103. *Steinmetz, C.P.* Theory and calculation of alternating current phenomena / C.P. Steinmetz. – McGraw-Hill Book Company, Incorporated, 1916. – T. 4.
104. *Steinmetz, C.P.* Power control and stability of electric generating stations / C.P. Steinmetz // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1920. – T. 39 – C. 1215–1287. DOI:10.1109/T-AIEE.1920.4765322.
105. *Yildirim, D.* Commentary on Various Formulations of Distortion Power D / D. Yildirim, E.F. Fuchs // IEEE Power Engineering Review. – 1999. – T. 19 – № 5 – C. 50–52. DOI:10.1109/39.761816.

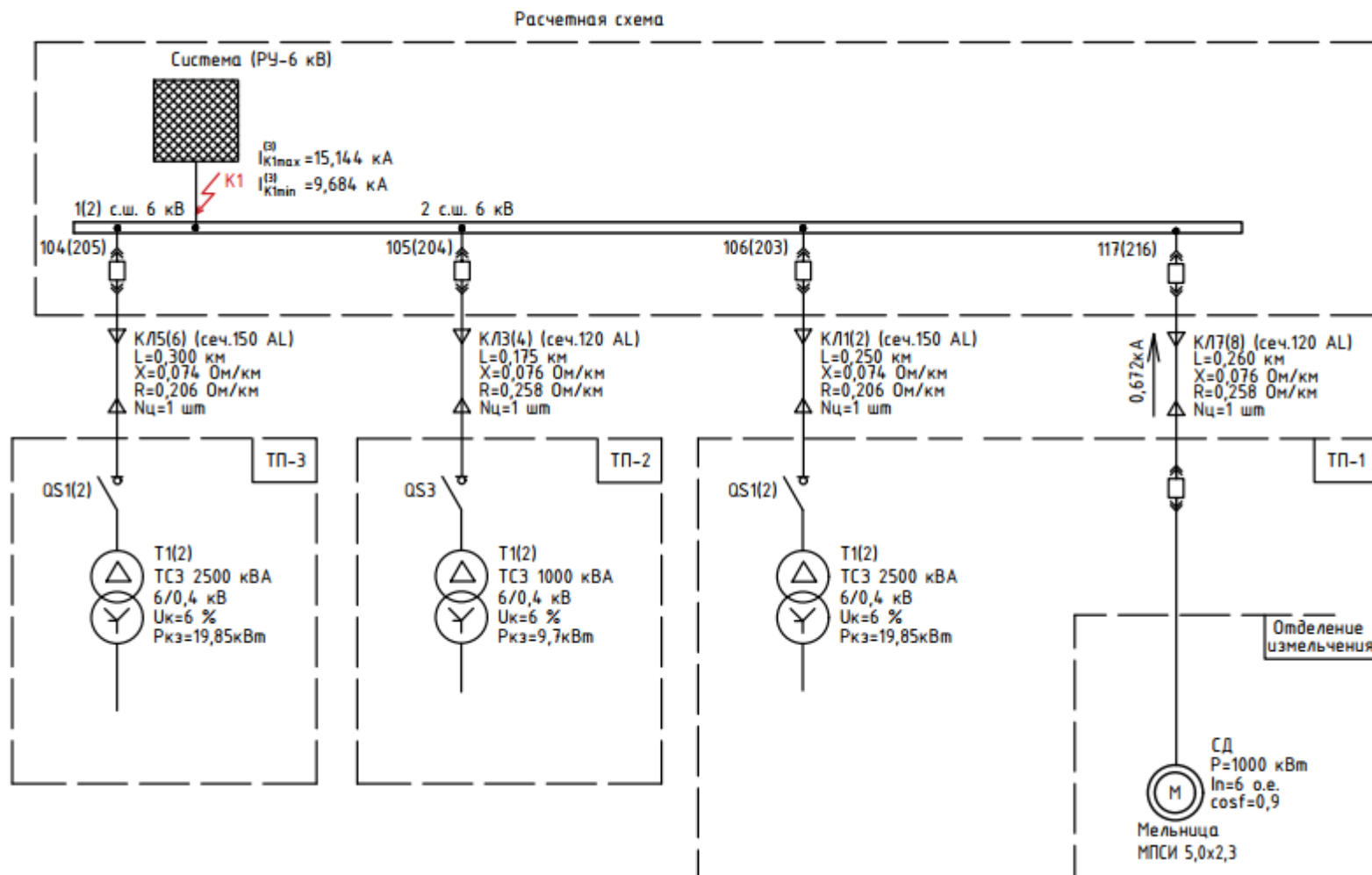
## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Расчетная схема первого предприятия среднего напряжения



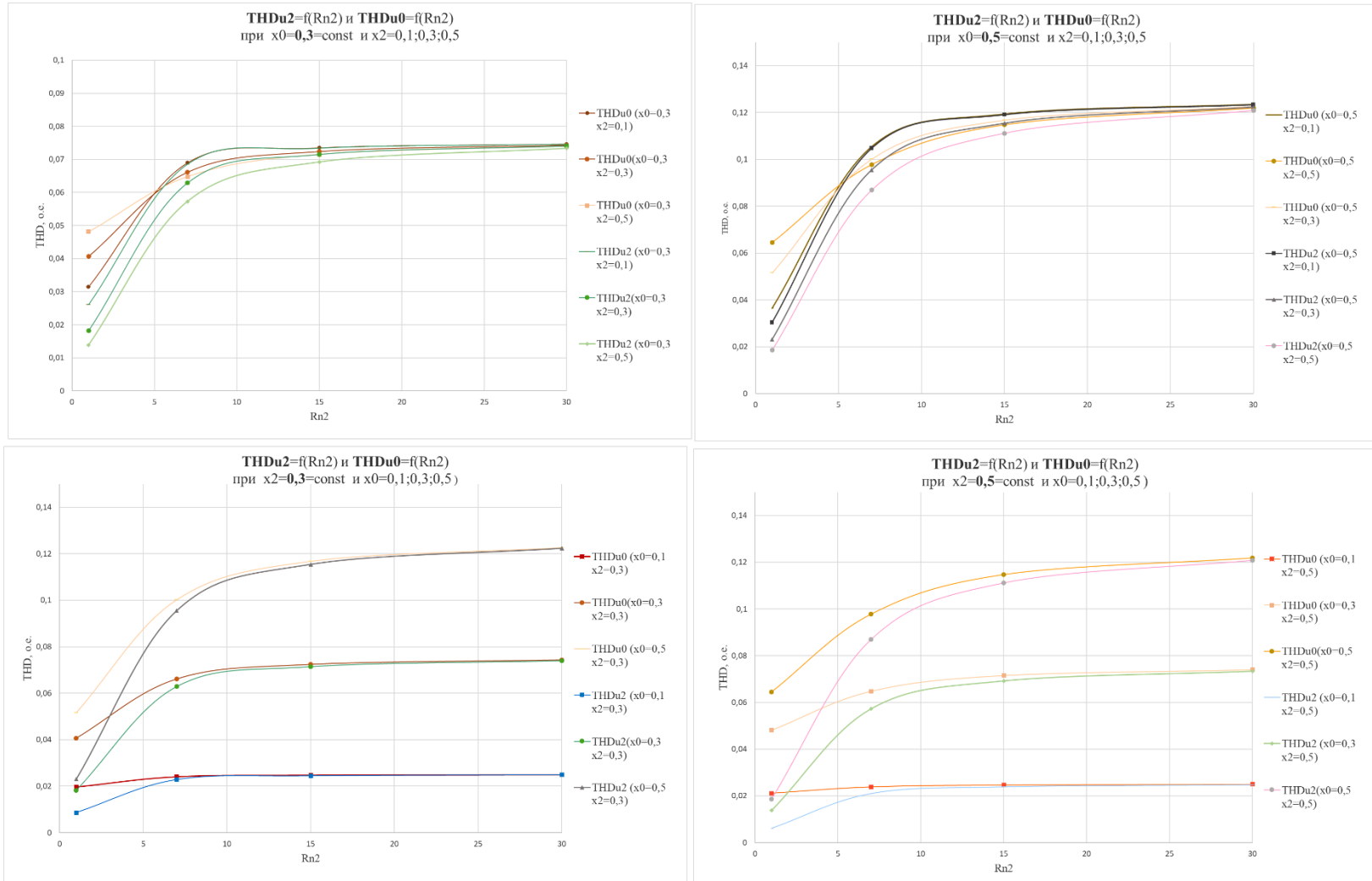
## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Расчетная схема третьего предприятия среднего напряжения



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Зависимость суммарного коэффициента искажения от изменения сопротивлений на линиях



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017617533

ПРОГРАММА БЫСТРОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СИММЕТРИЧНОЙ  
ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ  
НАПРЯЖЕНИЙ

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Крыльцов Сергей Борисович (RU),  
Пудкова Тамара Валерьевна (RU)*

Заявка № 2017614475

Дата поступления 17 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июля 2017 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Иалиев*

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2019614230**

**ПРОГРАММНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И  
МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Иванченко Даниил Иванович (RU), Коптев Владимир  
Юрьевич (RU), Пудкова Тамара Валерьевна (RU)*

Заявка № **2019612820**  
Дата поступления **19 марта 2019 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программы для ЭВМ **01 апреля 2019 г.**



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлев*

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по образовательной  
деятельности ФГБОУ ВО «Санкт-  
Петербургский Горный университет».



д.т.н. проф. А.П. Господарикова

06 2019г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Пудковой Т.В. «Повышение эффективности применяемых принципов учета потребления электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий при наличии искажений» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Горный университет».

В частности, разработанный способ применения мощности искажения и реактивной мощности, определяемых по методу Будяну для определения сочетания линейной и нелинейной нагрузки с последующей оценкой доли вклада отдельных потребителей в искажения общей сети, предлагаются для изучения на практических занятиях при обучении студентов направления 21.05.04 – «Горное дело» по профилю «Электрификация и автоматизация горного производства» и направления 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электропривод и автоматика».

В ходе практических и лабораторных занятий студенты осваивают методы определения спектра высших гармоник на интервале в один период основной гармоники.

Также, в учебном процессе предусмотрено изучение принципов учета электроэнергии в сети, содержащей искажения в токе и напряжении, основанном на применении введённого интегрального показателя тока, представляющего собой разность действующего значения полного тока и активной составляющей тока на основной гармонике.

Декан электромеханического факультета

д.т.н., проф.

Заведующий кафедрой электроэнергетики и электромеханики

д.т.н., проф.

В.В. Максаров

В.А. Швенет

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### Справка о внедрении результатов диссертационной работы производственную деятельность



Общество с ограниченной ответственностью «АСТЕРО»  
ОГРН 1097847303102 | ИНН 7806419840 | КПП 783801001  
190000, г. Санкт-Петербург, Набережная реки Мойки, д. 90, лит. А

☎ +7 (800) 555-30 74  
✉ mail@astero.com  
© www.astero.com

#### СПРАВКА

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы  
аспиранта Пудковой Тамары Валерьевны  
«Совершенствование учета потребления электроэнергии в электротехнических  
комплексах предприятий при наличии искажений»

Настоящим сообщаем, что результаты научных исследований, отраженные в диссертационной работе аспиранта Горного университета Пудковой Т.В., актуальны и представляют практический интерес в производственной деятельности ООО «АСТЕРО».

Разработанные автором новые технические решения в области учета электроэнергии при наличии высших гармоник приняты к внедрению при проектировании систем электроснабжения электротехнических комплексов, на которых по предварительным оценкам возможно ухудшение показателей качества электрической энергии.

Электротехническая лаборатория ООО «АСТЕРО», входящая в наш состав и зарегистрированная установленном порядке в СЗУ Ростехнадзора, применяет результаты проведенных научных исследований, в том числе при энергоаудите электротехнических комплексов предприятий с нелинейной нагрузкой.

Исполнительный директор  
ООО «АСТЕРО»



С.А. Турко